Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

На правах рукописи

## СВИРКО СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

# РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗА ОСЕДАНИЙ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НАД ДВИЖУЩИМСЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ЗАБОЕМ

Специальность 25.00.16 – «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель: доктор технических наук, профессор А. А. Ренёв

Кемерово 2018

ВВЕДЕНИЕ5
1. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА СДВИЖЕНИЙ
И ДЕФОРМАЦИЙ ПОДРАБАТЫВАЕМОЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ 11
1.1. Общие сведения о сдвижении и деформировании массива горных
пород и земной поверхности11
1.2. Эмпирические методы расчета сдвижений и деформаций 14
1.3. Исследования процесса сдвижения в динамике
1.4. Теоретические модели и моделирование
1.5. Выводы по главе 53
2. МЕТОДИКА И ОБРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ
НАБЛЮДЕНИЙ
2.1. Общие сведения о наблюдениях 55
2.2. Конструкции наблюдательных станций и особенности наблюдений 56
2.3. Пример наблюдений в условиях шахты им. Кирова, лава 2452 61
2.4. Используемые статистические гипотезы и критерии для установления
достоверности и надежности проведенных исследований 69
3. ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ И
ВЕРТИКАЛЬНЫХ СДВИЖЕНИЙ ОТДЕЛЬНЫХ ТОЧЕК
ПОДРАБАТЫВАЕМОЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ПРОФИЛЬНЫХ
ЛИНИЯХ ПО ПРОСТИРАНИЮ ЛАВ
3.1. Формирование динамической мульды сдвижений земной
поверхности при разработке пологих и наклонных угольных пластов Кузбасса с
повышенными скоростями подвигания очистных забоев

### Оглавление

 3.4.
 Аналитические
 представления
 взаимосвязи
 оседаний
 и

 горизонтальных
 сдвижений
 отдельных
 точек
 на
 профильных
 линиях
 по

 простиранию
 лав
 86
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 1

4.4. Выводы по главе..... 109

5. ПРОГНОЗА ОЖИДАЕМЫХ МЕТОДИКА ДИНАМИЧЕСКИХ СДВИЖЕНИЙ ОТДЕЛЬНЫХ ТОЧЕК ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ **ОТРАБОТКЕ** ПОЛОГИХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ КУЗБАССА ВЫСОКОМЕХАНИЗИРОВАННЫМИ ОДИНОЧНЫМИ ЛАВАМИ ...... 111

5.2. Исходные данные для прогноза..... 114

5.3. Параметры динамической мульды и её характерные зоны...... 116

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	
ЛИТЕРАТУРА	

#### введение

*Актуальность работы.* Существующие нормативно-методические документы в области расчетов сдвижений и деформаций подрабатываемой земной поверхности базируются на типовых распределениях (кривых), полученных по обобщениям инструментальных наблюдений 60 – 70-х годов XX века при скоростях подвигания очистных забоев до 150м/месяц (до 5м/сутки) и размерах выемки вкрест простирания до 80-120м. Расчеты выполняются для условий закончившегося процесса, динамика сдвижений и деформаций при формировании мульды сдвижения не учитывается.

Современные технологии отработки пластов предполагают увеличение скоростей подвигания забоев до 200-600м/месяц (до 20м/сутки) и размеров лав до 200-250м И более. Несмотря на продолжительную историю изучения геомеханических процессов, связанных с нарушением равновесия в массиве горных пород под влиянием горных разработок, влияние роста скорости забоя подвигания на изменение состояния массива и подрабатываемой поверхности в достаточной мере не исследовано и оценивается исследователями неоднозначно. Количественных характеристик этого влияния не установлено.

С переходом шахт на интенсивные способы добычи угля возрастает роль учета в геомеханических процессах фактора времени, внимание ученых и практиков фокусируется на вопросах изменения напряженно-деформированного состояния горного массива и развития процесса сдвижения в динамике. Этот интерес обуславливается тем, что промежуточные значения сдвижений и деформаций при формировании мульды сдвижений могут превышать их окончательные значения. То есть, при решении задач по защите сооружений и природных объектов с использованием окончательных величин параметров сдвижения без учета развития деформационных процессов во времени возникают противоречия между реальными деформациями земной поверхности И рассчитанными по нормативным документам.

Научные работы последних лет в области динамических процессов, сопровождающих активную стадию сдвижений дневной поверхности, затрагивают некоторые закономерности развития профиля динамической мульды в зависимости от положения линии очистного забоя. Закономерности сдвижения отдельных точек земной поверхности при этом не рассмотрены. В частности это касается количественного соотношения между оседаниями и горизонтальными сдвижениями и характера пространственных смещений точек земной поверхности при подработке.

Исследования в данном направлении дадут возможность разработки способов прогноза ожидаемых динамических сдвижений и деформаций любой точки подрабатываемой поверхности в зоне влияния горных работ отдельной лавы в динамике в зависимости от положения очистного забоя и приведут к созданию пространственных моделей процесса сдвижения.

**Целью работы** является разработка методики прогноза динамических сдвижений произвольной точки поверхности, расположенной в зоне влияния отдельной очистной выемки, для повышения качества геомеханических расчетов и эффективности геомеханического обеспечения освоения угольных месторождений.

**Основная идея работы** состоит в установлении параметров процесса сдвижения при формировании мульды на основе инструментальных наблюдений и разработке способа расчета сдвижений отдельных точек подрабатываемой поверхности при отработке угольных пластов пологого и наклонного залегания под инженерными и природными объектами, в том числе при выемке с высокими скоростями подвигания забоев.

#### Задачи исследования:

 установить взаимосвязь параметров сдвижения единичной точки при подвигании очистного забоя;

 установить влияние скорости подвигания очистного забоя на сдвижение поверхности;  разработать методику прогноза динамических вертикальных и горизонтальных сдвижений отдельной точки подрабатываемой поверхности.

#### Объект исследования:

 область подрабатываемой земной поверхности в зоне влияния очистной выемки с повышенными скоростями подвигания забоев.

*Методы исследования.* Используется комплекс методов, включающий в себя:

– анализ и обобщение литературных данных по рассматриваемой проблеме;

– проведение инструментальных наблюдений на реперных наблюдательных станциях;

статистическую обработку экспериментальных данных, корреляционный и регрессионный анализ;

#### Научные положения, защищаемые автором:

– Смещения точек поверхности, находящихся в границах влияния очистной выемки, при подработке происходят разноамплитудно, с разнонаправленными горизонтальными сдвижениями и разными соотношениями между сдвижениями в вертикальном и горизонтальном направлениях. В связи с особенностями сдвижений отдельных точек выделяются характерные зоны: 4 - в направлении движения забоя, 4 - в поперечном направлении.

– Для каждой из характерных зон динамическое оседание произвольной точки поверхности в мульде сдвижения может быть определено через величину подвигания забоя и максимальное оседание этой точки, соответствующие окончанию периода формирования динамической мульды, а динамическое горизонтальное сдвижение, в свою очередь - через величину динамического оседания.

– Максимальное оседание произвольной точки подрабатываемой поверхности зависит от ее расположения в мульде сдвижения. Влияние роста скорости подвигания очистного забоя на оседания точек полумульды со стороны монтажной камеры не установлено, для точек, расположенных в полумульде со стороны демонтажной камеры, увеличение скорости подвигания забоя уменьшает динамические оседания подрабатываемой поверхности – при росте скорости подвигания от 5 до 15м/сутки величина динамического оседания точки в зависимости от ее положения в полумульде «впереди забоя» снижается до 2,4 раз.

#### Научная новизна работы заключается:

 в установлении характерных зон сдвижения на разрезах вкрест и по простиранию лавы с различным характером смещения отдельных точек подрабатываемой поверхности;

 в установлении закономерностей развития динамических оседаний точек в выявленных характерных зонах в зависимости от положения забоя;

в установлении аналитической взаимосвязи вертикальных и горизонтальных сдвижений точек на профильных линиях вкрест и по простиранию лавы;

 в количественной оценке влияния скорости подвигания забоев на динамические оседания и горизонтальные сдвижения поверхности;

*Научное значение работы* состоит в выделении в динамической мульде характерных зон сдвижения, выявлении закономерностей движения в них точек подрабатываемой земной поверхности и установлении аналитических выражений взаимосвязей между параметрами мульды.

*Отличие от ранее выполненных работ* заключается в решении задач прогноза сдвижений отдельной точки подрабатываемой поверхности при современных скоростях разработки в динамической постановке. Впервые дана количественная оценка влияния скорости подвигания очистного забоя на динамические оседания и горизонтальные сдвижения поверхности, а также впервые установлены аналитические зависимости между оседаниями и горизонтальными сдвижениями.

Практическая ценность работы заключается в разработке методики прогноза динамических вертикальных и горизонтальных сдвижений заданных точек подрабатываемой земной поверхности в зависимости от положения

очистного забоя относительно монтажной камеры и скорости его подвигания при разработке пологих и наклонных пластов Кузбасса высокомеханизированными лавами.

*Достоверность научных результатов* обеспечивается сходимостью расчетных и экспериментальных данных, проверенной статистическими гипотезами и критериями с уровнем значимости не более 0,05.

*Личный вклад автора* заключается в:

- обобщении и анализе отечественных и зарубежных методик расчета сдвижений и деформаций подрабатываемой земной поверхности;

- проведении и последующей обработке частотных маркшейдерских наблюдений за сдвижением земной поверхности в процессе движения очистных забоев с повышенными скоростями от монтажной до демонтажной камеры в условиях Кузбасса;

- установлении характерных зон сдвижения точек земной поверхности в динамической мульде, выявлении в этих зонах закономерностей и аналитических зависимостей вертикальных и горизонтальных сдвижений от текущего положения очистного забоя и скорости его подвигания;

- разработке методики прогноза ожидаемых динамических сдвижений отдельных точек земной поверхности при отработке пологих угольных пластов Кузбасса высокомеханизированными лавами.

*Реализация работы.* Положения, разработанные в диссертации, реализованы в «Методике прогноза ожидаемых динамических сдвижений отдельных точек земной поверхности при отработке пологих угольных пластов Кузбасса высокомеханизированными одиночными лавами», 2018 г.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на XXIII Международном научном симпозиуме «Неделя горняка – 2015», Москва, 2015г.; IV Международной научно-практической конференции «Современные тенденции и инновации в науке и производстве», Междуреченск, 2015г.; на VI Уральском Горнопромышленном Форуме в рамках Всероссийской

научно-технической конференции с международным участием «Геомеханика в горном деле – 2015», Екатеринбург, 2015г.; Всероссийской научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы в горном деле», 2016г.; Международной научно-практической конференции Междуреченск, «Перспективы инновационного развития России», угольных регионов Прокопьевск, 2016г.; VII Международной научно-практической конференции «Инновационные направления проектировании горнодобывающих В Санкт-Петербург, 2016г.; Международном предприятий», симпозиуме «Инновационные технологии в горном деле и образовании (памяти профессора В.Г. Пронозы). International Innovative Mining Symposium (in memory of Prof. Vladimir Pronoza)», Кемерово, 2017г.; VIII Международной научно-практической конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий», Санкт-Петербург, 2017г.

*Публикации.* По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, в том числе 7 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

*Объем работы.* Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, изложена на 145 страницах машинописного текста и содержит 47 рисунков, 16 таблиц, а также список литературы из 115 наименований.

Автор выражает благодарность и глубокую признательность к.т.н. Петру Михайловичу Ларичкину и к.т.н. Алексею Ивановичу Быкадорову за неоценимую помощь и внимание к работе.

# 1. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПОДРАБАТЫВАЕМОЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

# 1.1. Общие сведения о сдвижении и деформировании массива горных пород и земной поверхности

Извлечение запасов полезного ископаемого вызывает сдвижение и деформирование массива горных пород и земной поверхности, что отрицательно сказывается на объекты, расположенные в зоне влияния горных разработок. Обеспечение безопасной подработки зданий, сооружений и природных объектов является одной из приоритетных задач горной науки и имеет продолжительную историю и общирную географию.

Ранний период научных исследований сдвижения горных пород связан с бурным развитием горнодобывающей промышленности и интенсивным ростом населения горнопромышленных районов и относится к первой половине XIX века. Перед горными предприятиями возникла проблема оценки возможного ущерба от горных работ зданиям, сооружениям, путям сообщения, сельскохозяйственным угодьям, что вызвало необходимость организовывать регулярные наблюдения за развитием процессов сдвижения земной поверхности и разрабатывать методы расчёта ожидаемых величин этих сдвижений.

Сложность процесса сдвижения горных пород, специфичность его проявления в различных горно-геологических условиях обусловило появление большого числа гипотез о формах и характере подрабатываемого горного массива. Все гипотезы неоднократно подвергались анализу, большая часть из них потеряла свое значение [1], а некоторые, например, «правило нормалей» [2], гипотезы «свода» [3, 4, 5, 6, 7], гипотеза «комбинированного сдвижения», гипотеза «балок» [8, 9, 10] нашли подтверждение в схеме и механизме сдвижения подработанной толщи пород на основе современных представлений о

геомеханических процессах в породном массиве при подземной разработке пластовых месторождений.

Следует добавить, что, несмотря на длительную историю развития отечественных и зарубежных научных исследований в сдвижении горных пород, пока нет единой научно обоснованной теории, раскрывающей внутреннюю сущность происходящих явлений и вытекающих из нее методов расчета деформаций вмещающих пород и земной поверхности.

Исторически изучение процесса сдвижения горных пород под влиянием подземных разработок начиналось с определения углов сдвижения, так как с их помощью определялись возможные границы влияния горных работ на земную поверхность и принимались меры охраны объектов поверхности. Значения углов сдвижения устанавливались после подработки земной поверхности, по факту, после чего производилась экстраполяция полученных величин на другие участки месторождения.

Что касается решения прогнозной задачи расчета ожидаемых сдвижений и деформаций внутри зоны влияния очистной выемки, можно сказать, что даже при современном состоянии наших знаний о процессе сдвижения подрабатываемых горных пород и мощной вычислительной технике трудно представить ход развития этого процесса во всем его объеме - от очистной выработки до земной поверхности. Поэтому от попыток создания общей механико-математической модели пришлось отказаться и пойти по пути разработки абстрактных или аналитических методов расчета на эмпирической основе, которые можно было бы применять для прогноза деформаций земной поверхности.

Как правило, задача расчета ожидаемых сдвижений и деформаций ограничивалась определением двух параметров – величины оседания  $v_z$  и горизонтального сдвижения  $v_{xy}$ , по значениям которых можно определить остальные параметры мульды – наклоны, кривизну, относительные деформации растяжения и сжатия. Исходными данными для расчета служили геометрические размеры очистной выработки (площадь выемочного участка, вынимаемая

мощность и угол падения угольного пласта, глубина разработки) и полученные из наблюдений граничные углы сдвижений и углы разрыва, а также некоторые характеристики механических свойств горных пород. Методы расчета вначале распространялись на конечную стадию процесса сдвижения, впоследствии были сделаны попытки вывести из этой конечной стадии промежуточные формы профиля мульды с учетом фактора времени.

Накопленный к настоящему времени значительный объем знаний о сдвижении и деформировании горных пород, их влиянии на подрабатываемые здания, сооружения и природные объекты позволил создать понятийный аппарат и разработать множество способов прогнозирования и определения параметров процесса сдвижения при различных технологиях разработки полезных ископаемых в разных горнодобывающих районах.

В конце 70-х годов Г. Кратч [11] сформулировал классификацию методов расчета деформаций подрабатываемой земной поверхности, которая не претерпела кардинальных изменений и в настоящее время. В этой классификации методы расчета подразделены по их основным предпосылкам, по способу выполнения расчета и применяемых при этом вспомогательных средств, по виду получаемого результата (табл. 1.1).

Таблица 1.1 - Классификация методов расчета деформаций земной поверхности по Г. Кратчу

	Вы	Форма получаемого	
Основа метода	Способ	Вспомогательные средства	результата
Эмпирические	Графический.	Геологический разрез,	Величины смещений
зависимости,	Аналитический.	интеграционная сетка	точек, максимальные
функции	Аналоговый.	(палетка).	значения параметров
распределения,	Вычисления при	Таблицы значений параметров.	процесса сдвижения,
теоретические	помощи ЭВМ.	Интегратор, аналоговый	типовые кривые
модели		вычислительный прибор.	профиля мульды
		Вычислительные машины	оседания.
		(ЭВМ).	

Как признает сам Кратч, строго разграничить методы по их основе невозможно, так как некоторые методы расчета, основанные на функциях

распределения, можно отнести также к эмпирическим методам, а некоторые - к методам теоретической модели.

В зависимости от полноты исходных данных и получаемых результатов Г.В. Орлов [12] разделяет существующие в настоящее время методики расчета на полные и сокращенные (упрощенные), а по степени обоснованности расчетных формул и способу их получения – на теоретические, эмпирические и полуэмпирические. Полными методиками расчета определяются ожидаемые значения деформаций во всех точках мульды сдвижения, упрощенными – вероятные значения максимальных деформаций.

Относительно более корректной классификации Г.В. Орлова можно добавить, что чистых эмпирических методов в научном познании не бывает, так как даже для простого наблюдения необходимы предварительные теоретические основания - выбор объекта для наблюдения, формулирование гипотезы и т.д., а теоретические методы требуют эмпирических фактов. При установленной взаимосвязи эмпирических и теоретических методов полуэмпирический метод классификации является лишним, а сами методы: эмпирический и теоретический между собой отличаются степенью теоретизации.

#### 1.2. Эмпирические методы расчета сдвижений и деформаций

Первые методы расчета оседаний земной поверхности основывались на полученном из данных наблюдений представлении, что оседание зависит от вынимаемой мощности пласта *M* и от угла его падения *α*:

$$v_z = M \cdot \cos \alpha \tag{1.1}$$

На горных рудниках в районе г. Эссена величина оседаний земной поверхности оценивалась по формуле:

$$v_z = a \cdot M \cdot z \tag{1.2}$$

где коэффициентами *a* и *z* учитывались способ выемки угля (с обрушением кровли или с закладкой выработанного пространства) и время, прошедшее после прекращения очистных работ.

Эмпирический секущих применяемый Саарском метод углов, В горнопромышленном районе, заключается в графическом определении положения центра мульды оседания и характерных точек ее профиля [11]. Для этого на разрезах по простиранию и по падению пласта от границ очистной выработки строятся линии, наклоненные к горизонту под различными углами. Эти линии пересекут земную поверхность в точках, в которых оседания составляют соответственно 0, 10, 84 и 100% от полного оседания (при  $\alpha = 0^{\circ}$ ). Отложив в полученных точках вниз соответствующие ординаты и соединив их концы плавной кривой, получим ожидаемую линию профиля мульды оседания.

К группе эмпирических методов относится разработанный ДЛЯ горизонтального и распространенный далее для наклонного залегания угольных пластов графический метод расчета оседаний при помощи интеграционной сетки (палетки), при котором обходятся без построения разрезов мульды сдвижения и без вычислений по каким-либо формулам, так как применяемая при этом методе интеграционная сетка выводится непосредственно по данным натурных измерений оседаний [11].

Базовым методом прогнозирования сдвижений и деформаций подрабатываемой земной поверхности в нашей стране является метод типовых кривых, по которым определяется поле сдвижений и деформаций в зоне влияния горных работ. Указанный метод является основополагающим для действующих «Правил охраны...» [13] и других нормативных документов, регламентирующих охрану подрабатываемых сооружений и природных объектов при разработке угольных месторождений [14-23]. Кроме нашей страны разновидности этого метода получили большое развитие в странах - бывших республиках СССР, а также в Великобритании, Польше, Венгрии.

В основу метода положен способ определения местоположения и размеров мульды с помощью углов сдвижения и распределений сдвижений и деформаций в главных сечениях мульды с их последующим переносом по параллельным сечениям. Исходные параметры для расчета (углы сдвижения и типовые

распределения) получены объединением горнодобывающих районов по схожести горно-геологических условий в группы с последующим усреднением результатов многолетних натурных наблюдений на реперных наблюдательных станциях.

Основным способом представления типовых функций традиционно является табличный вид. Однако при современных компьютерных технологиях и состоянии математического аппарата более удобным способом является использование аналитического задания типовой функции, что является несомненно удобным для дальнейшей компьютерной обработки данных с расчетом сдвижений и деформаций в любой точке мульды вне главных сечений.

В направлении аналитического задания типовых распределений предлагаются различные математические выражения, с помощью которых описывают эмпирические типовые кривые оседаний. Так, например, авторы публикации [25] по данным 53 профильных реперных линий в условиях Шахтинского угольного района получили усредненную типовую кривую оседаний, выраженную в относительных величинах (табл. 1.2).

Таблица 1.2 - Значения ординат Sz типовой кривой оседаний

Z	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Sz	1	0,933	0,820	0,673	0,510	0,361	0,244	0,151	0,079	0,024	0

Аналитическое выражение найденной кривой описывают уравнением Гаусса (табл. 1.3):

$$Sz = e^{-az^2} \tag{1.3}$$

где *а* – коэффициент, который определяют методом наименьших квадратов.

Таблица 1.3 - Аналитическая типовая кривая оседаний для Шахтинского угольного района

Z	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Sz	1	0,959	0,844	0,683	0,508	0,347	0,218	0,126	0,067	0,032	0

Первая производная от Sz является типовой кривой наклонов, а вторая – типовой кривой кривизны.

С.П. Колбенковым [26] для описания кривых оседаний была предложена функция:

$$S(z) = (1 - z)^{a \cdot z^{b} \cdot e^{c \cdot z}}$$
(1.4)

где z=x/L (L - длина полумульды, x – абсцисса рассматриваемой точки (начало координат в точке максимального оседания)), е – основание натурального логарифма, a, b, c – постоянные коэффициенты.

Эта функция была использована автором [27], который отмечает хорошие результаты ее применения.

Авторы публикации [28] аппроксимируют таблично заданные в нормативном документе [13] типовые функции выражениями:

$$S(z) = \exp(Cz + D)$$

$$S(z) = \exp(Bz^{2} + Cz + D)$$

$$S(z) = \exp(Az^{3} + Bz^{2} + Cz + D)$$

$$S(z) = \exp(Az^{3} + Bz^{2})$$

$$S(z) = Bz^{2} + Cz + D$$

$$S(z) = Az^{3} + Bz^{2} + Cz + D$$

$$S(z) = A \cdot \exp(B)$$
(1.5)

и по максимуму коэффициента корреляции выбирают из них наиболее подходящую:

$$S(z) = \exp(Az^3 + Bz^2) \tag{1.6}$$

Коэффициенты *А* и *В* для различных угольных бассейнов выражают через коэффициент подработанности *N* (табл. 1.4).

Таблица 1.4 - Показатели корреляционного анализа зависимостей A(N) и B(N)

Бассейн	Эмпирическая функция	а	b	с	$\delta_{ m cp},\%$	R
Кузнецкий	$A_N = aN^2 + bN + c$	-86,6	122,69	-44,54	6,23	0,995
	$B_N = aN^2 + bN + c$	54,42	-76,51	22,48	6,41	0,995
Донецкий	$A_N = aN^2 + bN + c$	-7,82	-4,18	5,87	6,66	0,995
	$B_N = aN^2 + bN + c$	21,92	-21,12	-0,517	13,35	0,996

Бассейн	Эмпирическая функция	а	b	с	$\delta_{ m cp},\%$	R
Печорский	$A_N = aN^2 + bN + c$	8,15	-26,34	12,36	0	1
	$B_N = aN^2 + bN + c$	-6,15	17,87	-12,35	0	1

В окончательном виде уравнение осадок, именуемое авторами «универсальной расчетной моделью сдвижений и деформаций земной поверхности», представляется в виде:

$$S(z) = \exp\left(A_N z^3 + B_N z^2\right) \tag{1.7}$$

Наклоны в пределах мульды сдвижения земной поверхности характеризуются первой производной от кривой оседания (1.7), а расчетная кривизна – второй производной.

Авторы публикации [29] «трансформируют» типовые кривые оседаний «Правил охраны...» [13], А.Н. Медянцева [30] и И.Ф. Озерова [31] в единую типовую кривую, аналитическое выражение которой для условий Донбасса имеет вид:

$$S(z) = e^{-0.7733z^4 - 3.3319z^3 - 1.6435z^2}$$
(1.8)

и делают вывод о том, что полученная типовая кривая характеризуется уменьшенной в 2 раза погрешностью и ее использование позволит получить с меньшей погрешностью типовые кривые наклонов, кривизны, горизонтальных сдвижений и относительных горизонтальных деформаций, как производных от типовой кривой оседаний.

Авторы публикаций [32, 33] для описания кривой оседаний используют элементарную функцию (1.9), называемую «логистической кривой» (разновидность сигмоиды, которая используется для описания изменения во времени исследуемого параметра *x* в соответствии с законом S-образного развития какого либо процесса):

$$y(x) = \frac{a}{1 + b \cdot e^{-c \cdot x}} \tag{1.9}$$

На построенной кривой авторы выделяют три этапа развития оседаний (рис. 1.1). Первый этап развития — это «вживание» системы в свое «окружение». Второй – быстрого роста, а третий – стабилизации процесса.



Рисунок 1.1 - Логистическая кривая описания главного параметра при развитии системы согласно S – образному закону

А.С. Ягунов в своей работе [24] S-образные функциональные зависимости различных параметров аппроксимирует разновидностью сигмоиды:

$$f(x) = a \cdot \operatorname{arcctg}(b \cdot x) + c \tag{1.10}$$

где *a*, *b*, *c* – эмпирические коэффициенты.

Заметим, что, несмотря на наличие различных вариантов математического представления типовых кривых оседаний и деформаций подрабатываемой земной поверхности, в нормативных документах они представляются в табличном виде, а промежуточные значения предлагается определять методом интерполяции.

При всех своих достоинствах, среди которых главное – использование фактических данных, полученных на основе многолетних инструментальных измерений, лабораторных и аналитических исследований процесса сдвижения горных пород и земной поверхности, опыта ведения горных разработок под инженерными и природными объектами, данный метод не свободен и от недостатков, которые вызваны различными причинами.

К сожалению, с начала изучения процесса сдвижения горных пород (с 19 века) до настоящего времени существенных изменений в плане определения с математической или физической стороны значений углов сдвижения не произошло. В нормативных документах приняты значения углов сдвижения, граничных углов и углов полных сдвижений, а также типовые распределения сдвижений и деформаций в мульде, полученные как средние результаты многочисленных наблюдений за сдвижением земной поверхности в определенном угольном бассейне или его части. При этом основная часть наблюдений производилась в 60-70-х годах прошлого века, когда глубины разработки угольных пластов, в основном, находились в районе 200-300м при скоростях подвигания очистных забоев не более 5м/сутки и размерах выемки вкрест простирания до 80-120м. Хотя большинство ученых сходилось во мнении, что углы сдвижения имеют только локальное значение, то есть определяют точку сдвижения на земной поверхности для определенного очистного забоя и глубины разработки, в нормативные документы по прогнозному расчету сдвижений вошли четко фиксированные значения углов сдвижения вне зависимости от глубины разработки и скорости подвигания очистных забоев. Также обстоит дело и с типовыми распределениями.

В настоящее время скорости подвигания высокомеханизированных очистных забоев составляют до 20м/сутки и более. Выросли и глубины разработки и размеры выработок вкрест простирания.

Кроме того, метод типовых кривых предназначен для условий закончившегося процесса сдвижения подрабатываемой земной поверхности и не учитывает его развитие в динамике. На современном этапе развития науки о сдвижении земной поверхности внимание ученых и практиков сосредоточено на вопросах именно развития процесса сдвижения во времени, так как всякий объект, любая точка земной поверхности, попадая в область влияния очистных работ, подвергается, прежде всего, воздействию изменяющихся сдвижений и деформаций, которые вызваны прохождением очистного забоя.

#### 1.3. Исследования процесса сдвижения в динамике

Решение задач по защите сооружений, основанных только на величинах параметров сдвижения после его окончания без учета развития деформационных

процессов во времени, приводит к противоречиям между реальным развитием деформаций земной поверхности И рассчитанными деформациями ПО нормативным документам. В процессе ведения горных работ значения параметров сдвижения – оседаний, наклонов, а также деформаций растяжения или сжатия непрерывно изменяются, причем здание или сооружение, в конечной подработки испытывающее, деформацию стадии например, сжатия В промежуточной стадии процесса может подвергнуться растяжению. Отсюда следует, что параметры развития процесса сдвижения во времени имеют большое практическое значение.

Широко известны результаты работ Авершина С.Г. [34], Иофиса М.А. [35], Медянцева Н.А. [36], Муллера Р.А. [37] и других, направленные на изучение развития процесса сдвижения земной поверхности во времени.

В результате маркшейдерских исследований на угольных месторождениях Донбасса разработан ряд способов расчета сдвижений и деформаций поверхности над движущимся очистным забоем. Основные положения этих способов расчета для условий Центрального Донбасса изложены в работах [38, 39, 40], Западного Донбасса – [41, 42]. Указанные исследования выполнены для условий стадии синхронного сдвижения, когда в мульде сформировалось плоское дно и профиль движущегося крыла мульды остается неизменным и перемещается совместно с очистным забоем. Область формирования мульды, образующаяся при отходе лавы от монтажной камеры, остается малоизученной. В условиях Кузбасса инструментальные наблюдения за сдвижением и деформациями земной поверхности над движущимся очистным забоем при разработке пологих и наклонных угольных пластов в новых условиях – с повышенными скоростями подвигания и увеличенными размерами лав вкрест простирания обобщил А.С. Ягунов [24].

Со смещением в настоящее время интересов исследователей в направлении изучения процесса сдвижения подрабатываемого горного массива и земной поверхности во времени и разработки методик прогнозирования и моделирования

параметров сдвижения обнаружилось, что почти каждый исследователь придерживается своей терминологии в обозначении параметров изменяющейся мульды сдвижений во времени и пространстве. Наиболее употребительными терминами для характеристики изменения сдвижений и деформаций массива и земной поверхности под влиянием движущегося очистного забоя являются: динамический процесс сдвижения; динамика деформаций; динамическая мульда сдвижений; динамические оседания и горизонтальные сдвижения; динамический угол сдвижения и так далее.

На симпозиуме «Неделя горняка – 2001» в МГГУ Г.А.Антипенко и В.А.Назаренко в качестве обсуждения был поднят вопрос о терминологии в области сдвижения земной поверхности [43]. Авторы утверждают, что в существующей маркшейдерской практике совершенно неуместно применение термина «динамическая мульда сдвижения», так как он относится к чему-либо «связанному с проявлением силы» - к движению объектов или их частей под влиянием некоторых приложенных сил, а в реальности - силы, вызвавшие сдвижения и деформации земной поверхности, в большинстве случаев, не рассматриваются. Предлагается изменяющемуся процессу сдвижения дать определение, которое употребил в свое время С.Г. Авершин – «кинетика процесса сдвижения» [44, 45] или «кинетическая мульда сдвижения». В связи с этим предложены следующие термины и определения: «...

• *мульда сдвижения земной поверхности* – участок земной поверхности, подвергшийся или подвергающийся сдвижению под влиянием горных выработок;

• *кинетическая мульда сдвижения* – участок земной поверхности в процессе его сдвижения под воздействием горных выработок без рассмотрения сил и напряжений, вызвавших сдвижение;

• *статическая мульда* – мульда сдвижения в состоянии установившегося равновесия горных пород после их подработки;

• прямая кинетическая полумульда – часть кинетической мульды сдвижения, расположенная над движущимся очистным забоем и передвигающаяся в направлении его подвигания;

• *обратная кинетическая полумульда* – часть кинетической мульды сдвижения, расположенная со стороны разрезной печи и развивающаяся в направлении, обратном подвиганию очистного забоя» [43].

Кинетика (греч. - приводящий в движение) - раздел механики (как и динамика), в котором движение изучается в зависимости от физических причин, его обуславливающих. Однако слово динамика в общелитературном смысле применяется для обозначения просто процессов, развивающихся во времени, зависимости от времени каких-то величин, не обязательно имея в виду конкретный механизм или причину этой зависимости. Слово кинетика в этом употребляется. Поэтому не смысле на наш ВЗГЛЯД прилагательное «динамическая» изменять на «кинетическая» не стоит, а вот в определениях самой динамической мульды и её элементов следовало бы установить единую терминологию.

Авторами работы [46] дается определение: *динамическая мульда сдвижения* (*динамическая волна*) – «это подрабатываемый массив горных пород и земная поверхность, которые при перемещении очистной выемки разделяются на участки с одновременными, но различными деформациями растяжений и сжатий. Динамическая мульда сдвижения ограничена плоскостями: впереди очистного забоя плоскостью, наклоненной под динамическим углом сдвижения; позади очистного забоя, где процесс сдвижения закончился, плоскостью, наклоненной в сторону выработанного пространства под углом полных сдвижений; плоскостями со стороны восстания и падения пласта, наклоненными под соответствующими углами сдвижения» [46].

«Во время подвигания очистного забоя перемещается и динамическая мульда сдвижения: вовлекаются в сдвижение новые участки массива горных

пород и земной поверхности, при этом зона растяжений перемещается вслед за подвиганием забоя и через определенный период сменяется зоной сжатий» [47].

А.С. Ягунов в своих исследованиях [24] отмечает, что отход очистного забоя от монтажной камеры характеризуется двумя изменяющимися во времени параметрами, определяющими динамическую мульду сдвижения в зависимости от местоположения забоя на разрезе по простиранию: положение точки максимального оседания и величину максимального оседания. Соответственно изменяются производные от сдвижений (наклоны, кривизна, горизонтальные деформации). При отходе очистного забоя от монтажной камеры максимум оседаний  $\eta_{max}$  в мульде растет до определенной величины, а положение точки с максимумом постепенно сдвигается в сторону очистного забоя (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 - Схема положения микромульд при движении забоя на участках  $D_2^1$ ,  $D_2^2$ ,  $D_2^3$ ,...,  $D_2^n$ 

При этом автором [24] вводится термин «*динамическая микромульда*» динамическая мульда сдвижения в начале своего развития (от начала возникновения до образования плоского дна). При этом положением точки максимального оседания автор делит микромульду на 2 полумикромульды, так как между ними имеются существенные отличия в распределении оседаний. Соответственно, вся динамическая мульда состоит из четырех разных по величине полумульд: две вкрест простирания и две по простиранию. Полумульда от разрезной печи до точки с максимальным оседанием называется «*полумульда позади забоя*», полумульда от точки с максимальным оседанием до демонтажной камеры - «*полумульда впереди забоя*».

Сложность вопроса динамики сдвижения массива горных пород и поверхности при их подработке высокоскоростными очистными забоями констатируется фактом, что даже при нынешнем уровне знаний и техники влияние роста скорости подвигания очистного забоя на геомеханические процессы породного массива, оценивается неоднозначно.

Часть исследователей [48, 49, 50, 24], основываясь на инструментальных наблюдениях за сдвижением горных пород и земной поверхности, считают, что увеличение скорости подвигания очистных работ в большинстве случаев уменьшает деформации земной поверхности, другие придерживаются иной точки зрения. Так, например, Гавриленко Ю.Н. [40], Муллер Р.А. [51], Медянцев А.Н. [52], Иофис М.А. [53], Земисев В.Н. [54], Костенич В.С. [55], Мякенький В.И. [56], Ковальски А. [57] установили, что рост скорости подвигания очистного забоя изменяет (уменьшает или увеличивает) продолжительность И интенсивность процесса сдвижения, не оказывая существенного влияния на величины сдвижений и деформаций земной поверхности.

Принимая во внимание, что скорость подвигания очистных забоев лав, над которыми проводились наблюдения, составляла 100-150м/мес и изменялась в незначительном диапазоне, можно предположить о её незначительном влиянии на процесс сдвижения земной поверхности. Однако с учетом современных скоростей и технологий, следует сделать заключение о преждевременности таких выводов.

Знание параметров процесса сдвижения помогает понять общую картину поведения массива горных пород и принять необходимые технические решения для обеспечения безопасности объектов земной поверхности, а также более обоснованно решать вопросы эффективного поддержания и охраны подземных выработок, управления горным давлением, определения гидрогеологических условий и других задач, поэтому изучение процесса сдвижения пород при горных разработках всегда являлось весьма важным направлением в геомеханике. Совершенствование методик учета динамических явлений в каждом из указанных направлений, уточняет и пополняет наше понимание о процессах сдвижения породного массива и поверхности.

Авторы работы [58] отмечают, что влияние скорости движения очистного забоя на геомеханические процессы, протекающие в массиве, весьма значительно. Под действием этого влияния происходит удлинение зависающих консольных слоев горных пород, в результате чего происходит перемещение точки перегиба кривой оседания, наклоны и текущие величины самих оседаний уменьшаются, а общая траектория точек дневной поверхности с развитием оседаний изменяется. В качестве инструмента для прогноза динамики обрушений авторами конечно-разностное использовалось математическое моделирование ЛЛЯ восточной лавы №13 по пласту  $l_1$  шахты им. А.Ф. Засядько. В качестве исходных параметров задавались три скорости движения лавы: 80м/месяц; 120м/месяц и 160м/месяц.

Исследованиями установлено, что характер динамики сдвижений подрабатываемой толщи (длину зависаний и их высота) существенно зависит от скорости подвигания лавы. При высоких скоростях длина зависаний составляла примерно 150 метров, при низких – около 50 метров. В процессе исследований по всей длине лавы наблюдалась общая неравномерность зависаний. С уменьшением скорости подвигания шаг зависаний уменьшался. При малых скоростях в некоторых участках лавы появлялись зависания локального характера.

Мустафин М.Г. [59] на основе выполненного плоского конечноэлементного моделирования делает вывод, что при высокой скорости породы кровли призабойной области могут не претерпевать значительных разрушений, Иная картина наблюдается при движении лавы с малой скоростью. При этом в краевой части скапливается большая энергия упругих деформаций с реализацией при разрушении пород с динамическим эффектом. Из исследований автора работы [60] следует, что в случае быстрого подвигания забоя наблюдается более интенсивное опускание кровли. С ростом скорости подвигания развитие трещиноватости в породах происходит медленнее, деформации пород уменьшаются, и как следствие устойчивость обнаженных пролетов кровли увеличивается.

В работе [61] показано, что в случае двукратного увеличения скорости подвигания очистного забоя опускание кровли на максимальном расстоянии от забоя уменьшается на 34 – 41% (при разных крепях и способах выемки). При этом наблюдается рост скорости опускания на 34 – 46%. В то же время автор [62] доказывает, что рост скорости подвигания забоя от 3-4 до 10-12м/сутки практически не изменяет величину опускания кровли.

Исследованиями в лабораторных условиях [63] установлено, что и впереди забоя, и в призабойном пространстве происходит уменьшение смещения кровли, вызванное увеличением скорости подвигания очистного забоя. Рост скорости подвигания с 1,3 до 20,7м/сутки приводил к уменьшению смещений кровли и почвы на расстоянии 4м от забоя в 4 раза. При изменении скорости в диапазоне 22,5 – 180м/месяц, наблюдается ряд изменений в характере поведения пород кровли. При скоростях подвигания до 40м/месяц породы непосредственной кровли над выработанным пространством интенсивно расслаиваются с резким обрушением. С ростом скорости подвигания процесс расслоения происходит с меньшей интенсивностью.

В работе [64] для условий шахты «Красноармейская-Западная №1» определяется зависимость времени разрушения пород от скорости движения лавы. Автор показал, что устойчивость кровли можно достичь изменением скорости подвигания до величины, при которой породный слой в зоне опорного давления не будет успевать разрушаться. В течение всего времени отработки выемочного столба должна быть обеспечена минимально допустимая скорость подвигания лавы, препятствующая разрушению кровли. Остановка очистного

забоя на время, большее, чем время разрушения пород, может вызвать обрушение кровли, ухудшение условий работы крепи, завал лавы.

Обобщая проведенный анализ работ [58-64], посвященных исследованию влияния скорости подвигания очистного забоя на призабойный массив и кровлю выработки, несмотря на неоднозначность сделанных в них выводов, можно утверждать, что наблюдаемые динамические явления в массиве найдут отражение и в мульде земной поверхности.

Согласно [65] пролет ослабленных пород в толще подработанного массива при росте скорости подвигания очистного забоя увеличивается. При этом угол наклона подработанной толщи уменьшается, в том числе пород непосредственной и основной кровель. Как следствие, происходит уменьшение смещения кровли и выполаживание мульды сдвижения на дневной поверхности.

Как уже было отмечено, однозначного мнения о влиянии скорости подвигания очистного забоя на изменение состояние дневной поверхности среди специалистов - геомехаников нет. Англичанин Бригс [66, 67] отмечал положительный эффект роста скоростей подвигания очистных забоев при выемке полезного ископаемого с уменьшением риска негативных последствий на объекты, расположенные в границах подработки. В работах И.М. Бахурина [68] также отмечается целый ряд случаев с благоприятным воздействием увеличения скорости подвигания очистных работ на состоянии объектов, расположенных на подрабатываемой горными работами территории.

Ниже (рис. 1.3) приведены зависимости скоростей оседания динамической мульды сдвижения от скоростей подвигания очистного забоя, построенная по работам С.Кнотте (кривая-1), С.Г.Авершина (кривая-2) и С.А.Батугина (кривая-3) [69, 34, 70].



Рисунок 1.3 - Зависимости скоростей оседания земной поверхности от скоростей подвигания очистного забоя

По данным этих наблюдений скорость оседаний при возрастании скорости подвигания очистного забоя снижается, а при скоростях свыше 4м/сутки кривые скоростей оседаний изменяются незначительно и асимптотически приближаются к горизонтальной оси.

С.А. Батугин указывает [70], что в каждых конкретных горно-геологических условиях существует некоторая скорость подвигания очистного забоя  $a_{min}$ , при которой сдвижения и деформации динамической и окончательно сформированной мульд сдвижения равны между собой. Степень уменьшения сдвижений и деформаций динамической мульды сдвижения по отношению к сдвижениям и деформациям окончательной мульды определяется отношением  $\frac{a}{a_{min}}$ , где a — фактическая скорость подвигания очистного забоя;  $a \ge a_{min}$ . Рост скорости подвигания забоя при условии:  $a < a_{min}$ , не влияет на сдвижения и деформации земной поверхности.

Для описания развития процесса сдвижения во времени Г. Кратч [11] использует временной коэффициент *z* в виде отношения:

$$Z = \frac{v_{Z_{\text{ДИН}}}}{v_{Z_{KOH}}} \tag{1.11}$$

где:  $v_{Z_{дин}}$  – оседания в промежуточной стадии;  $v_{Z_{KOH}}$  – оседания в конечной стадии.

Он отмечает, вопросах динамики развития ЧТО В сдвижений В подрабатываемом породном массиве существуют различия BO мнениях исследователей. По мнению одних, начало оседаний земной поверхности происходит сразу же после опускания непосредственной кровли в результате ведения очистных работ на небольшой площади выработки, другие утверждают, что от слоя к слою имеет место замедление оседаний в направлении снизу вверх, то есть скорость оседания породных слоев различается в зависимости от глубины залегания.

Разная скорость оседания породных слоев по глубине обусловлена деформациями разгрузки, направленными по нормали к напластованию, а, кроме того, расслоением пород над очистной выработкой. При этом по мере приближения слоев к земной поверхности прогибы слоев и оседания точек уменьшаются с одновременным уменьшением деформаций растяжения в направлении по нормали к напластованию. Если исключить влияние деформаций растяжения по нормали к напластованию, то относительная скорость оседания точек породного массива, лежащих на одной вертикали, от основной кровли до земной поверхности будет практически одинаковой.

При анализе динамики процесса сдвижения во времени следует различать измерения на наблюдательной линии, заложенной по простиранию или вкрест простирания пласта, и на отдельной точке, а, кроме того, сдвижения, происходящие над движущимся фронтом добычных работ, над неподвижным (исходным) забоем, и над временно приостановленном очистным забоем. По результатам наблюдений на отдельной точке можно выявить зависимость сдвижения этой точки от времени, а данные измерений на реперной линии показывают процесс формирования мульды сдвижения на разрезе породного массива.

Анализируя особенности развития мульды оседания по и вкрест простирания пласта (рис. 1.4), автор [11] отмечает, что экстремальные значения параметров процесса сдвижения вместе с движущимся забоем смещаются к

правому краю мульды. Кривые динамических значений параметров при движущемся забое, фиксируемых на I, II и III этапах отработки, отличаются от кривых конечной стадии развития процесса сдвижения, достигаемой при неизменном положении очистного забоя только через один – три года после прекращения горных работ. На приведенном рисунке кривая динамических значений оседаний III этапа отработки представлена пунктиром, а кривая оседаний конечной стадии процесса – сплошной линией).



Рисунок 1.4- Кривые сдвижения и деформации земной поверхности в мульде сдвижения для трех последовательных этапов подработки и разрез мульды сдвижения по наблюдательной линии, ориентированной по простиранию: I, II и III – конечная стадия сдвижения соответственно при неполной (I и II) и полной (III) подработке; 1 – асимметричный профиль, 2 – наблюдательная линия, 3 – критический максимум деформаций сжатия, 4 – окружность, ограничивающая площадь полной подработки

Оседания после прекращения очистных работ на рисунке выделены вертикальной штриховкой. Сдвижения земной поверхности над левой границей очистных работ (у разрезной печи) и зоной опорного давления возрастают только в процессе отработки первой половины площади. Дальнейшие очистные работы, проводимые вправо от положения, соответствующего II этапу отработки, уже не оказывают влияния на левую зону опорного давления.

По направлению вкрест простирания пласта с самого начала впереди и позади фронта очистных работ, параллельного наблюдательной линии, возникают стационарные зоны сдвижения (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 - Кривые сдвижения и деформации земной поверхности в мульде сдвижения для конечной стадии сдвижения в направлении вкрест простирания для трех этапов подработки наблюдательной линии тремя одновременно движущимися лавами (наблюдательная линия проходит через середину площади полной подработки)

В процессе подвигания очистных работ от начального положения 0 до конечного положения III мульда оседания на этой линии, проходящей через точку 23 первой наблюдательной линии, все время остается симметричной (что справедливо при горизонтальном залегании пласта). Однако глубина ее непрерывно возрастает, и, соответственно, непрерывно возрастают наклоны, кривизна, горизонтальные сдвижения и деформации растяжения над зоной опорного давления, а также деформации сжатия над средней частью мульды.

Автор констатирует, что «...профили мульды получаются тем более пологими, чем быстрее ведутся горные работы...» [11]. Как объясняет автор, это происходит потому, что данное положение профиля мульды достигается раньше или, наоборот, позднее, в зависимости от скорости подвигания забоя. То есть, работ при большой скорости проявление очистных влияния подвигания будет менее длительным, прогиб породных слоев - небольшим с незначительным уплотнением обрушенных пород. Следовательно, при увеличении скорости очистных работ происходит выполаживание следующего за забоем склона мульды и, как следствие – малые величины кривизны и наклонов земной поверхности. При этом скорость подвигания очистного забоя варьировалась от 0 до 4м/мес, или выраженная в долях радиуса R окружности, ограничивающей площадь полной подработки, от 0 до 2 *R* в год (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 - Типовые кривые оседания при различной скорости подвигания очистных работ

Современные технологии отработки угольных пластов на шахтах России характеризуется ростом интенсивности угледобычи с существенным увеличением нагрузки на отдельный очистной забой, что обуславливает увеличение скоростей подвигания, которые в настоящее время достигают 400-600м/месяц.

В этой связи особое место занимают работы А.С. Ягунова [24], посвященные вопросам сдвижений и деформаций земной поверхности в динамике при повышенных скоростях подвигания забоев лав (до 15м/сут.) в Кузбассе. На рисунке 1.7 представлено развитие динамической мульды сдвижения для различных положений очистного забоя, выраженных в относительных единицах.

Согласно [24] скорости оседаний в динамической мульде имеют по площади своё распределение, форма которого совпадает с кривой распределения Гаусса – ошибок протекания какого-либо случайного процесса. В этих распределениях автор выделяет две ветви в направлении движения лавы: впереди забоя, позади забоя, а также две ветви в направлении вкрест простирания: по падению и восстанию. То есть, при движущемся забое в мульде выделяется 4 ветви скоростей, а кроме того - 4 ветви при отходе лавы от монтажной камеры.



Рисунок 1.7 - Графики типовых кривых оседаний поверхности в главном сечении по простиранию пласта при отходе очистного забоя от монтажной камеры на расстояния  $D_2 = (0,3-1,6)H_{CP}$ 

Для анализа распределения скоростей оседания в мульде по 5-ти наблюдательным станциям с повышенными скоростями подвигания забоев использовались инструментальные измерения с периодичностью через 1-2 суток. По результатам наблюдений получены зависимости (рис. 1.8) максимальной скорости оседания  $v_{\eta m}$  в мульде от скорости движения забоя лавы (*c*) на разрезе по простиранию с учетом скорости оседания при остановленном забое лавы:

$$v_{\eta m \sigma \sigma} = rac{1}{\kappa_{\eta}} v_{\eta o c m.} (176 \cdot e^{0.074 c} - 135),$$
 мм/сут. при  $D_2 \ge 1,6 H_{CP};$ 

$$v_{\eta m. \partial M} = \frac{1}{\kappa_{\eta}} v_{\eta o c m.} (160 \cdot e^{0.058c} - 75),$$
мм/сут. при  $D_2 < 1.6 H_{CP}$  (1.12)



Рисунок 1.8 - Зависимости максимальной единичной скорости оседаний земной поверхности от скорости подвигания очистного забоя:
а) при отходе от монтажной камеры;
б) при развитом процессе сдвижения в полумульде впереди забоя

Полученные эмпирическим путем зависимости, по мнению автора, учитывают геометрические и механические свойства подрабатываемого массива пород: скорость подвигания забоя лавы, кратность оседания и инерционную способность массива деформироваться при остановленном забое.

Распределения скоростей оседаний в точках динамической мульды в главном сечении по простиранию при развитом процессе сдвижений определяются по формулам:

- в полумульде впереди забоя при  $D_2 \ge 1,6 H_{cp}$   $v_{\eta_{63}} = Sv_{\eta_{63}} \cdot v_{\eta_{1066}};$ 

- в микромульде при 
$$D_2 < 1,6 H_{cp}$$
  $v_{\eta.\partial.m} = Sv_{\eta.\partial.m} \cdot v_{\eta.m.\partial.m}$  (1.13)

где Sv<sub>1713</sub> и Sv<sub>1783</sub>, также определенные по экспериментальным данным, выбираются из таблицы 1.5.

Таблица 1.5 - Численные значения функций  $Sv_{\eta_{63}}$  <br/>и $Sv_{\eta_{.\partial M}}$ в точках  $z_i=\lambda_i\,/\,L_{_{3\partial M,63}}$ 

В динамической микромульде $L_{3\partial M}$ при $D_2 < 1,6 H_{cp}$													
$z_i = \lambda_i / L_{3\partial M}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$Sv_{\eta.\partial M}$	0	0,02	0,05	0,21	0,65	0,94	1,0	0,94	0,63	0,19	0,05	0,02	0
В полумульде впереди забоя $L_{3_{63}}$ при $D_2 \ge 1.6 H_{cp}$													
$z_i = \lambda_i  /  L_{3_{63}}$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,53	1,57	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
$Sv_{\eta 63}$	0	0,02	0,05	0,13	0,34	0,86	0,95	1,0	0,95	0,43	0,13	0,03	0

В главном простиранию установлены сечении ПО зависимости 1.9) (рис. земной поверхности максимальных величин наклонов И горизонтальных деформаций (рис. 1.10) от скорости подвигания очистного забоя.

Несмотря на полученные зависимости параметров процесса сдвижения подрабатываемой земной поверхности от скорости подвигания очистных забоев в методике прогнозирования сдвижений и деформаций в динамической мульде, автор их не использует.


Рисунок 1.9 - Зависимость наклонов (i) от скорости подвигания забоя лавы (c)



Рисунок 1.10 - Зависимость максимальных горизонтальных деформаций от скорости подвигания забоя лавы

Закономерности формирования динамической микромульды вкрест простирания лавы А.С. Ягуновым не установлены.

В работе [71, 111] в рамках продолжения исследований А.С. Ягунова [24] выполнены исследования изменения скорости оседаний и горизонтальных сдвижений в зависимости от скорости подвигания забоя. Для их расчета получены эмпирические формулы.

Скорости оседаний и горизонтальных сдвижений земной поверхности в главном сечении по простиранию лавы определяются по формулам:

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

$$v_{\eta M} = \frac{\eta_m}{H_{CP}} \cdot S v_{\eta M} \cdot (0,176 \cdot e^{0,074 \cdot c} - 0,135)$$
$$v_{\xi MM} = \frac{\eta_m}{H_{CP}} \cdot S v_{\xi MM} \cdot (0,32 \cdot c + 2,12) \text{ при } z \le 0,5$$
(1.14)

$$v_{\xi MM} = \frac{\eta_m}{H_{CP}} \cdot S v_{\xi MM} \cdot (-0.35 \cdot c - 1.73)$$
 при  $z > 0.5$ 

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

$$v_{\eta B3} = \frac{\eta_m}{H_{CP}} \cdot S v_{\eta B3} \cdot (0,160 \cdot e^{0,058 \cdot c} - 0,075)$$

$$v_{\xi B3} = \frac{\eta_m}{H_{CP}} \cdot S v_{\xi B3} \cdot (0,88 \cdot c - 0,03) \text{ при } z \le 0,5$$

$$v_{\xi B3} = \frac{\eta_m}{H_{CP}} \cdot S v_{\xi B3} \cdot (-0,65 \cdot c - 1,24) \text{ при } z > 0,5$$
(1.15)

В главном сечении вкрест простирания лавы скорости горизонтальных сдвижений земной поверхности определяются по формулам:

- в полумульде по падению 
$$v_{\xi y \Pi} = \frac{\eta_m}{H_{CP}} \cdot S v_{\xi \Pi} \cdot v_{\xi y \max};$$
  
- в полумульде по восстанию  $v_{\xi y B} = \frac{\eta_m}{H_{CP}} \cdot S v_{\xi B} \cdot v_{\xi y \min}$  (1.16)

где  $v_{\zeta y \max}$  и  $v_{\zeta y \min}$  рассчитываются по следующим формулам в зависимости от положения очистного забоя под профильной линией:

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

- в полумульде по восстанию 
$$v_{\zeta y \min} = -680 \cdot \left(\frac{d_x}{H_{CP}}\right)^2 \cdot e^{-2.8 \cdot \left(\frac{d_x}{H_{CP}} + 0.75\right)^2}$$
 (1.17)

Типовые распределения необходимые для расчета скоростей изменения оседаний и горизонтальных сдвижений в направлениях простирания и вкрест простирания определены.

Следует отметить, что закономерности движения точек мульды сдвижения в плоскости оседаний и горизонтальных сдвижений в зависимости от подвигания очистного забоя, как правило, исследователями не рассматривались. Развитие мульды сдвижения на стадии ее формирования остается практически неизученным. Отдельные публикации [48, 77 - 80] посвящены выявлению характерных точек, определению максимальных оседаний и наклонов земной поверхности при отходе лавы от монтажной камеры в горно-геологических условиях Донбасса. Общие закономерности развития мульды сдвижения не установлены.

Еще в 1941 г. С.Г. Авершиным [81] была дана схема траектории сдвижения точки земной поверхности при прохождении под ней очистного забоя (рис. 1.11).



Направление движения забоя

Рисунок 1.11 - Траектория движения точки земной поверхности при прохождении под ней очистного забоя

По оси оседаний выделено четыре участка: І образуется при приближении очистного забоя, II – в результате его прохождения под точкой, III – при удалении забоя, IV – после прекращения влияния удалившегося очистного забоя под действием уплотнения пород. Помимо остаточного оседания на участке IV автор выделяет дополнительное (по отношению к начальному положению точки) горизонтальное сдвижение в направлении движения забоя. Также отмечено, что в условиях слабых песчано-глинистых пород часть II может отсутствовать и часть I будет переходить в III. При этом I часть продолжается некоторое

время и после того, как забой пройдет под точкой и начнет удаляться от него. Поворот траектории в сторону удаляющегося забоя происходит с запаздыванием. Это запаздывание меньше в условиях Подмосковного бассейна и больше в условиях Донецкого бассейна. Таким образом, после прохождения очистного забоя и наступления условий полной подработки земной поверхности, точки земной поверхности в плоском дне мульды смещаются в горизонтальной плоскости. Направление этих смещений совпадает с направлением очистного забоя.

Также Авершиным было сформулировано положение о пропорциональности вертикальных и горизонтальных сдвижений [34], выражаемое зависимостью:

$$\xi = -K(y)\frac{d\eta}{dx} \tag{1.18}$$

где K(y) – коэффициент пропорциональности, не зависящий от координаты x и характеризующий распределительную способность массива.

Данное утверждение стало основой расчета горизонтальных сдвижений и деформаций земной поверхности для большинства методик. Согласно (1.18), взаимосвязь между вертикальным и горизонтальным перемещением любой точки в пределах мульды сдвижения характеризуется постоянным в данных условиях коэффициентом К. Так в методике определения ожидаемых сдвижений и деформаций [13] В качестве коэффициента пропорциональности между горизонтальными вертикальными сдвижениями используется И величина горизонтального Эта относительного сдвижения величина  $a_0$ . является постоянной в пределах влияния одной выработки. Её значение для условий Кузбасса принято равным  $a_0=0,25$ . Кроме того в данной методике, справедливой только для установившегося процесса сдвижений, принято:

 при полной подработке типовые кривые всех видов сдвижений и деформаций симметричны относительно середины полумульды;  в плоском дне мульды сдвижения все типы деформаций, а также горизонтальные сдвижения, равны нулю;

– характер распределения сдвижений и деформаций в главных сечениях одинаковый и не зависит от направления движения очистного забоя.

Однако исследования [82, 49] указывают на несоответствие вышеописанных характеристик и принятых положений по взаимосвязи вертикальных и горизонтальных сдвижений данным натурных инструментальных наблюдений.

Кроме того, автор [82] отмечает, что в плоском дне мульды наблюдаются горизонтальные сдвижения в направлении очистного забоя, величина которых составляет 30–33% от максимального оседания; на стадии затухания процесса сдвижения точек в области синхронного сдвижения остаточные горизонтальные сдвижения превышают остаточные оседания. Такое же положение отмечается при разработках рудных месторождений.

Автором [50] установлено, что зависимость между вертикальными и горизонтальными смещениями земной поверхности в краевой части мульды сдвижения в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей изменяется во времени и зависит от отношения величины достигнутого оседания к его максимальному расчетному значению. При медленном развитии процесса сдвижения коэффициент пропорциональности между вертикальными и горизонтальными смещениями определяется выражением:

$$a = 0.39 \cdot \left(\frac{\eta_t}{\eta_{\text{max}}}\right)^{-0.1} \tag{1.19}$$

при ускоренном оседании:

$$a = 0.33 \cdot \left(\frac{\eta_t}{\eta_{\max}}\right)^{0.3} \tag{1.20}$$

Исследованиями А.С. Ягунова [24] установлено, что плоское дно в мульде по простиранию пласта формируется при отходе очистного забоя от монтажной камеры на расстояние  $D_2 \ge 1,6H_{CP}$ . Из-за блочности обрушения вмещающих

пород, неравномерности выемки угля по мощности пласта, колебаний его угла падения и рельефа местности, изменений мощности и физических свойств наносов и других факторов плоское дно не является идеально ровным и, следовательно, величина остаточных горизонтальных сдвижений В нём колеблется 1.12). Оценка этих колебаний, В некоторых пределах (рис. произведенная по данным инструментальных наблюдений на шахтах Кузбасса, определяется выражением:

$$\xi_{\mathcal{A}HO} = \pm 0.12 \cdot \eta_m \tag{1.21}$$

где  $\eta_m$  – максимальное оседание.



Рисунок 1.12 - Пример распределения относительных горизонтальных сдвижений земной поверхности в плоском дне мульды оседаний по простиранию пласта на шахте «Котинская»

Авторами исследований [83] установлено, что в условиях Кузбасса вид траекторий движения точек подрабатываемой земной поверхности в вертикальной и горизонтальной плоскостях зависит от их положения в мульде сдвижения, а направления остаточных горизонтальных смещений могут быть как в сторону очистного забоя, так и в сторону разрезной печи. В процессе проводимого анализа наблюдений за высокоскоростными забоями шахт Кузбасса наличие участка II, характеризующегося процессом «чистого» оседания и образующегося по С.Г. Авершину [81] в момент прохождения забоя под наблюдаемой точкой, в траекториях движений точек не установлено.

По этим же исследованиям установлено, что горизонтальные сдвижения со стороны разрезной печи при формировании мульды сдвижений могут превышать оседания в 5 раз.

Анализ объема публикаций в отечественной литературе, посвященных динамическим процессам активной стадии сдвижений подрабатываемой земной поверхности, вряд ли составит несколько процентов от общего числа исследований в области познания геомеханических процессов, возникающих и протекающих в подземной угледобывающей геосистеме с целью создания основ управления ее состоянием. Это свидетельствует о недостаточной проработанности данного направления.

#### 1.4. Теоретические модели и моделирование

Теоретические методы базируются на закономерностях механики сплошной среды или стохастических закономерностях в зависимости от принятой модели массива. Пород массив принимают как упругую, пластическую, вязкую, сыпучую или другую идеальную среду. Математические описания состояния и поведения таких сред при их разработке громоздки, имеют большое количество трудно определяемых характеристик. Следует отметить специалистов, чьи работы связаны с развитием аппарата математического моделирования и его применения для решения геомеханических задач: Б.З.Амусин [84], Ю.Н.Гавриленко [85], О.Зенкевич [86, 87], Ю.А.Кашников [88, 89], М.Г.Мустафин [90], А.Б. Фадеев [91], В.В. Чеботаев [92] и другие.

Основанные на математических моделях методы расчета сдвижений и деформаций, напряженного состояния массива вокруг выработанного пространства также сложны и в настоящее время в инженерных расчетах применяются редко. Среди существующих методов математического моделирования можно указать следующие: метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод граничных элементов, метод дискретных элементов, метод конечных объёмов, метод компонентных цепей, метод узловых потенциалов и др. Наиболее распространенным и универсальным методом является конечно-элементная процедура анализа напряженно-деформационного состояния твердого тела.

К настоящему времени значительные успехи достигнуты в применении метода конечных элементов (МКЭ). Данный метод анализа напряженнодеформационного состояния горного массива позволяет учитывать слоистость массива пород, процессы разрушения, наличие и развитие трещиноватостей, влияние времени и изменение приложенных внешних нагрузок, обусловленное развитием горных работ.

При реализации МКЭ сплошную среду заменяют набором элементов конечных размеров, которые соединены между собой в узловых точках [93]. Выбор расчетной модели осуществляется так, чтобы максимально отразить структуру конкретной геологической среды с учетом слоистости, прочности и деформационных характеристик горных пород. К границам расчетной модели прикладывают граничную нагрузку или их жестко закрепляют. Затем решаются уравнения равновесия, увязывающие между собой силы в узлах и их перемещение. Деформации массива горных пород и, в том числе параметры сдвижения земной поверхности определяют по найденным перемещениям узловых точек.

Современные программы метода конечных элементов представляют собой уже не просто метод расчёта напряжений, а по существу аппарат математического моделирования процессов, протекающих в исследуемых объектах. В частности, применительно к процессам геомеханики в этих программах величины вычисляемых напряжений автоматически проверяются на соответствие условиям равновесия и неразрывности в случае сплошной среды или другим условиям для дискретных моделей, они также автоматически сопоставляются с прочностными параметрами среды. Метод конечных элементов реализован в таких хорошо известных программных комплексах как Ansys, Cosmos, Abaqus, Plaxis, FEM models, GeoSlope, GEO5, CEOTEX, Gemcom и других. Использование этого программного обеспечения (ПО) позволяет успешно решать самые разнообразные прикладные задачи: от блочного моделирования и подсчета запасов полезных ископаемых до проектирования горных работ на месторождении и стратегического планирования.

Как и любой другой численный метод, МКЭ является приближенным в силу целого ряда идеализаций и упрощений реальных процессов. Результаты расчета полностью зависят от выбора исходных характеристик. Поэтому к расчетам, выполненным в современных программных комплексах, реализующих МКЭ, нужно относиться критически, и обеспечивать по возможности многовариантность моделирования в спектре исходных свойств.

В подавляющем большинстве случаев исследователи используют данные методы для получения в различных локальных условиях величин оседаний и деформаций земной поверхности. Достоверность результатов прогноза во всех случаях определяется из сравнения расчетных показателей сдвижений с фактическими, измеренными в натурных условиях. При этом авторами не указываются причины полученных отклонений и предполагается случайная природа этих причин. Так, например, автор публикации [94] разработал численную модель для расчета сдвижений скального массива, в которой за основу была взята однородная упруговязкопластическая модель В. Виттке [95]. По этой численной модели, реализованной в комплекте программ СЕОТЕХ, позволяющем прогнозировать величины напряжений, сдвижений и деформаций при открытой, подземной и комбинированной отработке рудных месторождений, анализировать развитие зон разрушения и делать выводы об устойчивости подрабатываемых объектов, произведены расчеты сдвижений земной поверхности и горных пород для различных горнотехнических ситуаций на Малышевском и Тишинском рудных месторождениях. Исследовалось влияние модуля упругости пород и закладки, прочностных характеристик (сцепления, внутреннего трения), а также

угла дилатансии на величины сдвижений. Результаты расчетов свидетельствуют, что величины сдвижений растут при уменьшении модуля упругости пород и закладки. Получена удовлетворительная сходимость рассчитанных и замеренных сдвижений. На том же месторождении дальнейшие исследования методами МКЭ и МДЭ развивает автор [96].

Авторы публикаций [97 - 99] используют метод конечных элементов для оценки влияния вариации деформационных и прочностных показателей горных пород, естественный случайный разброс которых составляет порядка 100% от их на величины сдвижений подрабатываемой среднего значения, земной поверхности. Моделировалась отработка одиночной очистной выработки в условиях Донецко-Макеевского угледобывающего района. При реализации математического моделирования авторами были приняты следующие горногеологические и горнотехнические условия: Глубина разработки 210м, длина лавы 290м. Мощность угольного пласта составляет около 1,7м, угол падения 0°, породы средней обрушаемости, представленные перемежающимися слоями алевролитов и песчаников средней прочности. Средняя мощность слоев 10-15м. Мощность четвертичных отложений - 60м. Управления кровлей - полное обрушение. Скорость отработки угольного пласта столбовой системой 100-150м/месяц. Марка добываемого угля - К. Модуль деформации принимается 0,001-15ГПа, коэффициент Пуассона 0,1-0,5, угол внутреннего трения составляет 10-50°, сцепление 0,001-15МПа. Плотность пород 2500кг/м<sup>3</sup>, объемный вес  $0.025 \text{MH/m}^3$ .

Вначале авторы получают так называемую «детерминированную» мульду сдвижения путем задания средних физико-механических свойств массива и определения оседаний в узлах исходной сетки модели. По утверждению авторов полученная мульда сдвижения согласуется с «Правилами подработки...» [100]. Из-за горизонтального залегания пласта изолинии оседаний принимают вид эллипса. Максимальные оседания зафиксированы над центром лавы и составляют 1,25м.

После построения детерминированной мульды сдвижения выполняется «стохастическое моделирование» [97 - 99]. Каждый элемент исходной сетки задается со случайным диапазоном условий. С помощью генератора случайных чисел для характеристик каждого элемента (прочность материала элемента, его деформационная характеристика или все механические показатели одновременно) выбирается случайное отклонение и его знак. Конкретный набор случайных отклонений механических свойств модели во всех конечных элементах обуславливает индивидуальные отличия получаемой мульды сдвижений от детерминированной мульды. Таким образом, получают названную авторами «стохастическую мульду» сдвижений.

Для оценки разброса было проведено «стохастическое моделирование» путем решения одной и той же задачи с разными наборами случайных значений механических свойств вмещающих пород. В результате объединения всех стохастических мульд сдвижений получено семейство распределений оседаний (рис. 1.13).



Рисунок 1.13 - Распределение оседаний земной поверхности при случайных выборах исходных данных

Далее, используя методы математической статистики и теории вероятности, авторы получают оценки доверительных интервалов вариации сдвижений и деформаций. На рисунке ниже показаны графики ожидаемых и расчетных оседаний земной поверхности в главном сечении полумульды сдвижения, рассчитанные по «Правилам подработки...» [100], и доверительные интервалы сдвижений и деформаций по предлагаемой авторами методике (рис. 1.14). В средней части мульды максимальный разброс оседаний составляет 32%, наклонов - 55%, кривизны - 118%. Все показатели на границе мульды сдвижений составляют примерно треть от максимальных, наблюдаемых в центре мульды.



Рисунок 1.14 - График значений оседаний, рассчитанных по действующей и предлагаемой методикам

По мнению авторов надежность определения расчетных оседаний и деформаций земной поверхности при ее подработке длинными очистными забоями существенно повышается. За счет учета двухстороннего возможного отклонения оседаний и деформаций от ожидаемого уровня и характера их распределения по длине полумульды возможно более обоснованное принятие мер охраны сооружений и природных объектов.

Автор диссертационной работы [101] использует упрощенную модель (рис. 1.15) для анализа геомеханических процессов, происходящих в массиве и на поверхности при сооружении эскалаторных тоннелей. Для исследования качественных закономерностей развития процессов сдвижений и деформаций в массиве горных пород использовались различные модели среды, реализуемые в программном обеспечении конечно-элементного моделирования Plaxis 3D [102].



Рисунок 1.15 - Конечно-элементная модель массива с эскалаторным тоннелем

По результатам моделирования автор устанавливает, что в пределах слабых слоев вблизи границы их контакта с более прочными локализуются наибольшие вертикальные сдвижения. Вблизи контура тоннеля преобладают вертикальные сдвижения (оседания), локализованные в шелыге свода тоннеля. В боковых частях контура тоннеля в массиве реализуются и оседания, и горизонтальные сдвижения. Согласно результатам моделирования объем мульды на поверхности не превышал объем, характеризующий конвергенцию тоннеля. В пределах слоев, характеризующихся малыми значениями модулей деформации, локализованы В боковой части максимальные деформации массива. контура тоннеля локализуется область наибольших горизонтальных сдвижений, вследствие чего

происходит увеличение размера мульды сдвижения на поверхности в поперечном сечении с ростом значений оседаний. При строительстве эскалаторных тоннелей с помощью тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК) форма мульды сдвижения представляет собой яйцеобразную форму, с ее расширением над заглубленной частью тоннеля.

С помощью моделирования для эскалаторных тоннелей, пройденных ТПМК в Санкт-Петербурге, для мульд главных поперечных сечений были рассчитаны сдвижения и деформации: вертикальные и горизонтальные сдвижения, горизонтальные деформации, наклоны и кривизна.

Автор отмечает, что для решения таких задач необходим комплексный подход с использованием данных натурных наблюдений для обеспечения требуемой точности полученных качественных закономерностей. Это позволит разработать инженерную методику прогноза сдвижений и деформаций на земной поверхности.

Авторами публикации [103] выполнено упругопластическое моделирование деформирования земной поверхности при сооружении стволопроходческим фирмы «Herrenknecht» вертикального ствола в программном комплексом комплексе Plaxis. Моделирование выполнено с использованием критерия прочности Кулона – Мора. Моделируемый массив состоит из насыпного грунта (мощность 4м), чередующихся слоев водонасыщенных супесей и суглинков 7м), а также слоя твердой глины, залегающего на глубине 40м. (мощность Физико-механические характеристики приняты по данным «Правил охраны...» [13]. По результатам моделирования при учете технологии проходки при различных диаметрах ствола выполнены расчеты и составлены графики смещений. Установлено, что величина вертикальных оседаний у контура ствола после его проходки составляет 220мм.

В процессе проходки данного ствола механизированным комплексом в радиусе 30м проводились наблюдения за состоянием околоствольного грунтового массива. Мониторинг за деформациями показал, что первые оседания были

зафиксированы при достижении глубины 8м - при переходе стволопроходческого комплекса границы разделения геологических слоев (из насыпного грунта в водонасыщеные супеси). Размер оседаний за 7 дней составил 150мм (около 21мм/сутки) при 6-ти метровом радиусе зоны распространения вертикальных деформаций. Эти оседания большей частью были связаны с вымыванием грунта из-под фундамента комплекса. Размер вертикальных оседаний при дальнейшем строительстве достиг 350мм при расчетных 200мм. Расхождение возникло из-за процесса вымывания грунта, который не учитывался при моделировании оседаний приконтурного грунта. Радиус опасной зоны равен 5-6м.

На основании выполненных исследований авторы делают вывод, что результаты деформирования, полученные при моделировании процесса проходки приконтурного грунта, имеют хорошую сходимость с фактическими данными с расхождением не более, чем на 20мм. Следовательно, при строительстве вертикальных выработок в грунтах аналогичного строения и свойств данный подход вполне приемлем для прогнозирования максимальных вертикальных оседаний.

При моделировании слвижений деформаций математическом И подрабатываемой земной поверхности должна быть задана модель грунта, в котором будет формироваться мульда сдвижения, а также массив горных пород с расположением очистной выработки. Наиболее часто исследователи в расчетах используют идеальную упругопластическую модель с критерием прочности Кулона-Мора, которая вследствие постоянства модулей объемного сжатия и сдвига весьма схематично описывает поведение реального грунта. Однако к достоинствам модели следует отнести использование минимального числа параметров. Необходимость проведения громоздких и сложных опытов по определению формы поверхности нагружения ограничивает применение моделей, основанных на ассоциированном законе пластического течения (Modified Cam-Clay и другие). Требуют проведения менее трудоемких лабораторных опытов и достаточно точно описывают поведение грунта на простых траекториях

нагружения упругопластические модели, базирующиеся на деформационной теории пластичности. Зависимости деформационной теории пластичности и теории пластического течения используются смешанными моделями (Hardening Soil Model, HS-small model и др.).

В настоящее время существует множество разнообразных моделей. Наиболее популярные из них используются в приведенных выше расчетных программных комплексах, которые получили широкое применение в проектной практике. Исследователи, как правило, стоят перед выбором: либо использовать простую модель с минимальным набором известных параметров, либо применять более сложную с рядом параметров, требующих дополнительных определений. Применение сложной модели, теоретически, должно приводить к результатам, лучше согласующимся с фактом. Однако в сложной модели более точное описание грунта может нивелироваться ошибками определения его параметров. В результате, окончательный выбор в пользу той или иной модели должен осуществляться на основании сравнения результатов моделирования с данными натурных наблюдений.

Автор публикации [104] отмечает, что применяемые сложные модели (Hardening Soil Model (HSM) программы PLAXIS или упрочняющаяся упруговязко-пластическая модель программы FEM models) существенно лучше учитывают работу грунта, чем простейшие методы расчета, но имеют более сложный набор параметров. Удовлетворительное отображение моделью работы грунта возможно только при правильном назначении этих параметров. В случае стабилометрических испытаний, отсутствия возможность задать стабилометрический модуль деформации отсутствует. К сожалению, во многих случаях расчетчики принимают «с потолка» недостающие параметры с соответствующими «среднепотолочными» результатами моделирования. При этом происходит дискредитация самой идеи применения сложных моделей. Кроме того, недостающие параметры часто назначаются программой «по умолчанию». Точность такого параметра является абсолютно случайной. Это

похоже на выполнение с помощью датчика случайных чисел геологических изысканий. То есть, использование сложных моделей механики грунтов без подробных инженерно-геологических изысканий с лабораторными испытаниями (в том числе стабилометрическими) вряд ли оправдано.

Заметим, что на данный момент инструментальных и лабораторных исследований в рассматриваемом направлении при изменившихся горногеологических и горнотехнических условиях разработки угольных месторождений и сравнивать результаты математического моделирования с натурными наблюдениями не представляется возможным.

#### 1.5. Выводы по главе

На основании выполненных исследований можно сделать следующие основные выводы:

- базовым методом прогнозирования сдвижений и деформаций подрабатываемой земной поверхности в нашей стране является метод типовых кривых, по которым строятся кривые сдвижений и деформаций. Этот метод основан на обобщениях инструментальных наблюдений, полученных при скоростях подвигания забоя до 5м/сутки, и не учитывает динамические явления процесса сдвижения подрабатываемой земной поверхности;

- решение задач по защите объектов и сооружений, основанных только на величинах параметров процесса сдвижения после его окончания без учета развития деформационных процессов во времени, приводит к противоречиям реальным расчетным состоянием сдвижений деформаций между И И подработанной поверхности – промежуточные значения сдвижений и деформаций могут превышать их окончательные величины. Динамика процесса сдвижений точек поверхности, расположенных в зоне влияния очистной выемки, для разработки научно обоснованных методик предрасчета на сегодняшний день изучена недостаточно;

- основные параметры процесса сдвижений земной поверхности над длинными очистными забоями со скоростями их подвигания до 150м/мес. при разработке угольных месторождений достаточно хорошо изучены в статике, когда процесс сдвижений в основном завершился, а подработанная толща пришла в новое равновесное состояние. Для решения задачи прогноза сдвижений в динамической постановке необходимы исследования, позволяющие установить взаимосвязь параметров сдвижения от подвигания очистного забоя;

- современные условия предполагают увеличение скорости подвигания очистных забоев до 20м/сутки и более. Несмотря на продолжительную историю изучения геомеханических процессов отмечается неоднозначное толкование относительно влияния скорости подвигания очистного забоя на профиль мульды сдвижения при ее формировании. Количественных характеристик этого влияния для выполнения соответствующих оценок ранее не устанавливалось;

- исследования последних лет в области динамических процессов, сопровождающих активную стадию сдвижений подрабатываемой земной поверхности в условиях Донбасса и Кузбасса, охватывают лишь некоторые закономерности формирования профиля динамической мульды сдвижений в зависимости от подвигания очистного забоя лавы. Закономерности сдвижений отдельных точек земной поверхности, установление которых приведет к созданию пространственных моделей процесса сдвижения, в этом профиле не рассматриваются.

создание методики прогноза динамических сдвижений расширит инструментарий специалистов-геомехаников повысит качество И обоснований геомеханических при решении научно-практических задач обеспечения безопасности объектов поверхности при подземной разработке угольных месторождений Кузбасса, в том числе при выемке с высокими скоростями подвигания забоев.

## 2. МЕТОДИКА И ОБРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

#### 2.1. Общие сведения о наблюдениях

Выполненные в настоящей работе исследования и обобщения основаны на результатах инструментальных наблюдений за сдвижением земной поверхности в процессе движения очистных забоев от монтажной до демонтажной камеры с повышенными скоростями в условиях Кузбасса. Закладка сети наблюдательных станций и проведение на них частотных наблюдений, в которых автор принимал непосредственное участие, осуществлялись Сибирским Филиалом ВНИМИ в рамках накопления экспериментального материала. Объектами исследований стали следующие наблюдательные станции:

- шахта «Грамотеинская», лава 631, пл. Сычевский III (II);
- шахта «Котинская», лавы 5204 и 5205, пл. 52;
- шахта им. Кирова, лавы 2446 и 2452, пл. Болдыревский;
- и другие (всего 17 наблюдательных станций).

Горно-геологические условия закладок наблюдательных станций приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Горно-геологические условия закладок наблюдательных станций

№	Шахта	Станция, лава, пласт	<i>Н<sub>СР</sub></i> , м	<i>D</i> <sub>1</sub> , м	<i>D</i> <sub>2</sub> , м	$N_1$	<i>т</i> , м	α, град	<i>с</i> , м/сут
1	Грамотеинская	лава 631, пл. Сычевский	227	210	1785	0,75	3,5	5	4,5 – 7,6
2	Котинская	лава 5204, пл. 52	230	230	2410	0,78	4,5	8,5	7,5 – 12,0
3	Котинская	лава 5205, пл. 52	166	236	2400	0,93	4,6	9	6,8 – 15,2
4	им. Кирова	лава 2446, пл. Болдыревский	250	233	> 1000	0,75	2,42	7	5,7
5	им. Кирова	лава 2452, пл. Болдыревский	314	250	> 600	0,69	2,35	6	6,9 – 15,0
6	Пионерка	пл.10	190	190	1320	0,74	1,4	18	2,6

N⁰	Шахта	Станция, лава, пласт	<i>Н<sub>СР</sub></i> , м	<i>D</i> <sub>1</sub> , м	<i>D</i> <sub>2</sub> , м	$N_1$	<i>т</i> , м	α, град	<i>с</i> , м/сут
7	Распадская	пл.6-ба	205	120	1150	0,55	4,4	17	3,1
8	Полысаевская	178, пл. Надбайкаимский	120	120	1550	0,73	2,7	10	3
9	Березовская	127, пл. ХХІ	125	200	1330	1,00	1,8	13	2
10	Западная	пл. 4	150	155	1100	0,75	1,4	9	1,2
11	Карагайлинская	лава 3112, пл. Сергеевский	172	120	1040	0,60	3,2	20	2
12	Им. Ярославского	143, пл. Наджуринский- 2	105	80	1460	0,63	1,5	18	4,3
13	Комсомолец	142, пл. Толмачевский	240	260	1340	0,78	1,8	16	1,3
14	Комсомолец	141, пл. Бреевский	150	180	1375	0,83	1,75	16	1
15	Чертинская- Южная	95, пл.2	60	100	735	1,00	1,35	16	6,5
16	Чертинская-1	147, пл.3	235	180	880	0,63	1,4	6	2,5
17	Чертинская-1	163, пл.3	120	160	1100	0,89	1,6	5	4

Расшифровка параметров таблицы 2.1:  $H_{CP}$  – средняя глубина разработки, м;  $D_1, D_2$  – ширина и длина лавы, м;  $N_1$  – коэффициент подработки в поперечном сечении лавы; m – вынимаемая мощность пласта, м;  $\alpha$  - угол падения пласта, град.; c – скорость подвигания очистного забоя, м/сут.

#### 2.2. Конструкции наблюдательных станций и особенности наблюдений

Каждая из наблюдательных станций состояла из двух профильных линий грунтовых реперов, заложенных до появления влияния очистных выработок в направлениях простирания и вкрест простирания лав. В свою очередь каждая профильная линия состояла из рабочих и опорных реперов, последние из которых закладывались на концах профильных линий и располагались вне зон сдвижения земной поверхности. Перед началом наблюдений производилась привязка опорных реперов наблюдательной станции к ближайшим пунктам маркшейдерской опорной геодезической сети (определение координат). В качестве реперов использовались забивные металлические стержни, откованные на остриё, длиной 1,8м и диаметром 20-22мм. На участках, где повреждение реперов наблюдательной станции исключалось, производилась закладка реперов незаглубленного типа с выступающей на 2-3см над земной поверхностью хвостовой частью. В иных случаях, когда при движении автотранспорта, ведении промышленных или сельскохозяйственных работ или по другим причинам реперы могли быть повреждены, использовалась закладка реперов с их заглублением. Центры наносились с помощью молотка и керна после забивки реперов в грунт. Указанные конструкция реперов и способ их закладки в грунт обеспечивают:

- 1) их надежную сохранность на весь срок службы наблюдательной станции;
- прочную связь с грунтом, при которой сдвижение грунта вызывало бы такое же сдвижение реперов;
- удобство наблюдений за их сдвижением в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Наблюдения за сдвижением, вызванным подработкой земной поверхности, заключались в инструментальном определении положений рабочих реперов относительно опорных на разные даты с одновременной фиксацией положения линии очистного забоя. Кроме того фиксировалось образование трещин различной формы и величины, прямых и обратных уступов и т.п. Скорости подвигания забоев лав при подработке наблюдаемой поверхности составляли от 140 до 456м/месяц.

Положения рабочих реперов в вертикальной плоскости (в плоскости оседаний) способом определялись традиционным периодическими нивелировками с помощью оптического нивелира немецкого производства Koni-007 и инварных реек с пузырьковыми уровнями, а в горизонтальной – измерением расстояний между реперами (длин интервалов) 30-метровой стальной компарированной рулеткой РЗОУЗК ГОСТ 7502-89.

Первоначальные наблюдения производились до начала подработки профильных линий. Последующие частотные наблюдения, позволяющие проследить и оценить формирование динамической мульды сдвижения по мере подвигания забоя лавы, производились с периодичностью через 1-3 дня. Нивелировка и измерения длин между реперами производились по допускам «Инструкции по наблюдениям...» [14].

Нивелирование реперов наблюдательных станций производилось либо замкнутыми ходами (с опорными реперами с обеих сторон профильных линий) либо прямом обратном Рейки висячими ходами В И направлениях. устанавливались непосредственно на реперы. Определение разности высотных отметок реперов (превышений) осуществлялось из середины интервала между связующими реперами по двум шкалам (основной и дополнительной), при этом расстояние от связующих реперов до инструмента не превышало 75м. полученных превышениях Расхождение В реперов, ПО основным И дополнительным шкалам, не превышало 3мм.

троекратно Измерения длин интервалов выполнялись лля каждого интервала при постоянном натяжении мерного прибора 98H (≈10кг) с фиксацией силы натяжения с помощью динамометра. Расхождения в измерениях длины интервала не превышали 2мм. За измеренную длину интервала принималось среднее значение из трех измерений. При необходимости вынос центров реперов ОЖ-3 помощью жестких отвесов с базой 700мм. осуществлялся С обеспечивающих проецирование центра с точностью до 1мм.

Результаты полевых наблюдений записывались в специальные журналы и после окончания каждого единичного наблюдения аналитически и графически обрабатывались, в том числе с использованием широкого спектра инструментов математических программ Mathcad и Excel.

Обработка данных полевых измерений проводилась последовательно в несколько этапов: сначала были определены средние значения измеренных величин, далее были вычислены высотные отметки реперов профильных линий и рассчитаны необходимые поправки, затем были определены горизонтальные расстояния между рабочими и опорными реперами (с учетом поправок).

Горизонтальные расстояния между реперами профильных линий вычислялись с использованием поправок:

 $\Delta l_1$  – поправка за температуру, вычисляемая по формуле:

$$\Delta l_1 = l\alpha (t - t_K), \qquad (2.1)$$

где *l* – длина измеренной линии, мм;

α - коэффициент линейного расширения;

t – температура воздуха при измерении длин, С°;

 $t_K$  – температура воздуха при компарировании рулетки, С°.

 $\Delta l_2$  – поправка за компарирование, определяемая по данным приведенным в свидетельстве компарирования рулетки;

 $\Delta l_3$  – поправка за провес, вычисляемая по формуле:

$$\Delta l_3 = \frac{l^3}{L^3} \Delta L , \qquad (2.2)$$

где *L* – дина всей рулетки;

 $\Delta L$  – поправка на всю длину рулетки, рассчитываемая по формуле:

$$\Delta L = \frac{2,67f^2}{L},$$
 (2.3)

где f – стрела провеса всей рулетки.

При выполнении условия осуществления всех измерений (начального и всех последующих) одной и той же рулеткой поправки за компарирование и провес не вводились.

 $\Delta l_4$  – поправка за наклон, вычисляемая по формуле:

$$\Delta l_4 = -\left(\frac{h^2}{2l} + \frac{h^4}{8l^3} + \frac{h^6}{16l^5}\right),\tag{2.4}$$

где h – превышение (разность высотных отметок концов интервала).

Общее расхождение в суммарной длине профильной линии из прямого и обратного измерений не превышало 1:10 000 длины линии.

Дальнейшие расчеты величин сдвижений и деформаций по каждой профильной линии во всех единичных наблюдениях производились на персональном компьютере по известным формулам:

а) оседания, м:

$$\eta = H_{m-1} - H_m, \tag{2.5}$$

где  $H_{m-1}, H_m$  - высотные отметки репера соответственно из предыдущего и данного наблюдений, м;

б) наклоны:

$$i = \frac{\eta_n - \eta_{n-1}}{l}, \qquad (2.6)$$

где  $\eta_n, \eta_{n-1}$  - величины оседания соответственно переднего и заднего концов интервала, мм; *l* - длина интервала из начального наблюдения, мм;

в) кривизна, 1/м:

$$K = \frac{i_n - i_{n-1}}{l_{cp}},$$
 (2.7)

где  $i_n, i_{n-1}$  - величины наклонов соответственно последующего и предыдущего интервалов;  $l_{cp} = \frac{l_n + l_{n-1}}{2}$  - полусумма длин последующего и предыдущего интервалов;

г) горизонтальные сдвижения, м:

$$\xi = D_2 - D_1, \tag{2.8}$$

где  $D_1$ ,  $D_2$  - горизонтальные расстояния от опорного репера до данного соответственно из первого (предыдущего) и повторного (последующего) наблюдений, м;

д) горизонтальные деформации:

$$\varepsilon = \frac{d_2 - d_1}{l},\tag{2.9}$$

где  $d_1, d_2$  - приведенные длины интервалов соответственно из первого (предыдущего) и повторного (последующего) наблюдений, м.

Таким образом, в результате проведенной обработки были получены сдвижения и деформации точек подрабатываемой поверхности на разные даты (или на разные положения линии очистного забоя).

#### 2.3. Пример наблюдений в условиях шахты им. Кирова, лава 2452

В качестве примера приведем данные по одной из наблюдательных станций шахты им. Кирова – по лаве 2452.

Отработка лавы 2452 по пласту Болдыревскому-24 производилась в 2008 – 2009гг. очистным механизированным комплексом RS2400/650 (Джой), оснащенным очистным комбайном 4LS-20 и забойным скребковым конвейером AFG30/800/600, перегружателем SBL с транспортом отбитого угля ленточным конвейером 4ЛЛТ-1200. «Паспортом выемочного участка лавы №2452» определена суточная нагрузка на очистной забой  $A_{CYT}$ =6770т/сут, и добыча угля за месяц  $A_{MEC}$ = 203т.т./мес. При этом скорость подвигания забоя планировалось поддерживать на уровне  $C_{MEC}$ =325м/мес (или  $C_{CYT}$ =10,8м/сут), при средней вынимаемой мощности пласта – 2,5м, ширине захвата бара – 0,76м, и длине очистного забоя  $D_1$ = 250м. Фактическая скорость подвигания забоя лавы 2452 изменялась от 208 до 450м/мес.

В границах влияния отработки лавы 2452 находятся лавы, отработанные в период с 1976 по 1981г. по вышележащим пластам Бреевский и Толмачевский. Вынимаемая мощность пл. Бреевского - 2,60м; пл. Толмачевского – 2,18м. По пласту Болдыревскому в 2007г. произведена отработка смежной лавы 2451.

Глубина разработки лавы 2452 по пласту Болдыревскому-24 изменялась от 240м до 360м при вынимаемой мощности от 2,2м до 2,5м. Длина лавы вкрест простирания 250м, по простиранию 2690м. Угол падения пласта изменяется от 0° до 6°.

Состав подрабатываемой толщи типичен Ленинского пород для 60-70% месторождения: толщи сложено глинистыми разностями пород (алевролитами и аргиллитами) и угольными пластами, 40-30% составляют песчаники, мощность отдельных слоев которых составляет 25-30м. Наносы мощностью до 18м представлены почвенно-растительным слоем до 0,5м, суглинками, глинами и галечниковыми отложениями до 3,0м в основании.

Расчетная общая продолжительность процесса сдвижения, определенная по средней скорости подвигания забоя лавы, составляет Т=69сут., в т.ч. период опасных деформаций t=44сут.

Наблюдательная станция, заложенная в главных сечениях прогнозной мульды сдвижения, состояла из 2-х профильных линий грунтовых реперов, одна из которых длиной 917м была ориентирована по направлению подвигания лавы (І профильная линия), вторая, длиной 692м, перпендикулярна первой (ІІ профильная линия).

Разбивка и привязка наблюдательной станции производилась от пунктов геодезической сети путем прокладки теодолитного хода по допускам «Инструкции по наблюдениям за сдвижением горных пород, земной поверхности и подрабатываемыми сооружениями на угольных и сланцевых месторождениях», М., 1989.

Расстояние между реперами на рабочих участках профильных линий было принято в зависимости от средней глубины разработки H<sub>CP</sub>=314м – 20м. Но из-за сложностей рельефа фактические расстояния составили от 4м (интервалы R<sub>13</sub> - R<sub>14</sub> и R<sub>15</sub> - R<sub>16</sub> - при спуске к и подъеме от линии воды р. Иня и R<sub>20</sub> - R<sub>21</sub> и R<sub>21</sub> - R<sub>22</sub> – при переходах через дамбу) до 40м (R<sub>14</sub> - R<sub>15</sub> – при переправе через р.Иня). Общее количество реперов на станции – 100, в т.ч. 64 – в направлении простирания лавы и 36 – в направлении вкрест простирания. План наблюдательной станции приведен на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 - План наблюдательной станции на ш. им. Кирова, лава 2452 пласта Болдыревский-24

Наблюдения за сдвижением подрабатываемой поверхности проводились по методике, приведенной ранее в настоящем разделе, бригадой из 5-ти человек. Частота наблюдений - через один день, так как в наблюдении находились одновременно 2 лавы: лава 2452 и лава 5204 на шахте «Котинская». Всего с июня 2008г. по июль 2009г. было произведено 31 наблюдение. Выполненные частотные наблюдения позволяют проследить формирование профиля динамической мульды сдвижения, а также оценить сдвижения отдельных точек подрабатываемой поверхности по мере подвигания забоя лавы, скорость которой изменялась в широких пределах (от 6,9 до 15,0м/сут).

В процессе наблюдений за реперами II профильной линии (вкрест простирания) зафиксированы случаи образования трещин: на расстоянии 3,2м от

 $R_{11}$  в сторону  $R_{10}$  – трещина раскрытием 1,5см; на расстоянии 4,0м от  $R_{12}$  в сторону  $R_{13}$  – трещина раскрытием 2,0см (см. рис. 2.4).

Аналитическая обработка результатов полевых измерений включала: поверку полевых журналов и вычисление средних значений измеренных величин, вычисление высотных отметок всех реперов, определение горизонтальных расстояний между реперами (с введением поправок), вычисление сдвижений и деформаций реперов по вышеприведенным формулам раздела. Результаты вычислений сдвижений по I и II профильным линиям представлены в графическом виде на рис. 2.2-2.5.

Анализ и обобщение результатов инструментальных наблюдений с позиций выявления закономерностей сдвижения отдельных точек дадут возможность разработки методик прогноза ожидаемых динамических сдвижений и деформаций любой точки подрабатываемой поверхности в зоне влияния горных работ отдельной лавы в зависимости от положения очистного забоя и приведут к созданию пространственных моделей процесса сдвижения.





Рисунок 2.3











График горизонтальных сдвижений по II профильной линии вкрест простирания пласта Болдыревского - 24 от лавы №2452 "Шахта им. С.М. Кирова" 2008-2009 гг.

# 2.4. Используемые статистические гипотезы и критерии для установления достоверности и надежности проведенных исследований

Решение поставленных задач осуществлялось методами корреляции и регрессии. Теория и методы корреляционного анализа использованы для выявления связей между параметрами формирующейся динамической мульды сдвижения и оценки тесноты этих связей. Основной задачей регрессионного анализа являлось установление формы и аналитических зависимостей между параметрами. Наиболее адекватными функциями, описывающими динамику вертикальных и горизонтальных сдвижений отдельных точек подрабатываемой поверхности, являются: линейная, экспоненциальная и обратная тригонометрическая.

Для выявления формы связи между параметрами строились корреляционные поля (рис. 3.5, 3.6, 3.10, 4.6, 4.10 – 4.12), по виду которых подбиралось аналитическое выражение. Теснота связи между исследуемыми параметрами x и y при линейной зависимости оценивалась по коэффициенту корреляции  $r_{xy}$ ; при нелинейной – корреляционному отношению  $R_{yx}$ , вычисляемых по формулам:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x}) (y_i - \overline{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2} \cdot \sum_{i=1}^{n} (y_i - \overline{y})^2}; \ R_{yx} = \sqrt{\frac{\delta_{iy}^2}{\delta_y^2}}$$
(2.10)

где  $\overline{x}$ ,  $\overline{y}$  - средние арифметические исследуемых параметров в одной совокупности; n – число пар данных;  $\delta_{iy}^2$ ,  $\delta_y^2$  - межгрупповая и общая дисперсии зависимого параметра в совокупности. Межгрупповая дисперсия отражает ту часть общей дисперсии признака-результата y, которая объясняется влиянием признака-фактора x.

Оценка значимости (существенности) линейного коэффициента корреляции и корреляционного отношения выполнялась с использованием *t*-критерия Стьюдента. При этом наблюдаемое (фактическое) значение этого критерия определялось по формуле:

$$t_{HAET} = \sqrt{\frac{r_{xy}^2 \cdot (n-2)}{1 - r_{xy}^2}}$$
(2.11)

Значение, рассчитанное по формуле (2.11), сравнивалось с критическим значением t-критерия, которое бралось из таблицы значений t-критерия Стьюдента с учетом заданного уровня значимости  $\alpha = 0,05$  и числа степеней свободы (n-2). Если  $t_{HAET} > t_{HAET} (n-2;0,95)$  связь между результативным и факторным показателем является надежной (0,95 – уровень доверительной вероятности).

Достоверность аппроксимации оценивалась коэффициентами детерминации  $r_{xy}^2$  и  $R_{yx}^2$ , которые характеризуют точность аппроксимации, то есть показывают насколько точно найденные аналитические зависимости описывают реальный процесс динамических сдвижений точек поверхности в мульде. Чем ближе коэффициенты детерминации к 1, тем точнее модель описывают имеющиеся данные. Для оценки значимости аналитической модели использовался *F*-критерий Фишера, который заключается в следующем. Выдвигается нулевая гипотеза  $H_0$  о том, что уравнение в целом статистически незначимо:  $H_0$ :  $R_{yx}^2 = 0$  на уровне значимости  $\alpha$ . Далее определяют фактическое значение F-критерия для однофакторной модели по формуле:

$$F = \frac{R_{yx}^2(n-2)}{1-R_{yx}^2}$$
(2.12)

Табличное значение  $F_{\text{ТАБЛ}}$  определяется по таблицам распределения Фишера для заданного уровня значимости и степенях свободы для равных 1 и *n*-2 (или через функцию Excel: *FPACПОБР*(*вероятность*;1;*n*-2)). Уровень значимости  $\alpha$  – это вероятность отвергнуть правильную гипотезу при условии, что она верна ( $\alpha$  принималось равным 0,05).  $F_{\text{ТАБЛ}}$  - это максимально возможное значение критерия под влиянием случайных факторов при данных степенях свободы и уровне значимости  $\alpha$ . Если фактическое значение *F*-критерия меньше табличного, то нет основания отклонять нулевую гипотезу. В противном случае, нулевая гипотеза отклоняется и с вероятностью (1-α) принимается альтернативная гипотеза о статистической значимости уравнения в целом.

Результаты расчета указанных статистических критериев для оценки достоверности и значимости приведенных в 3 и 4 главах закономерностей динамических сдвижений точек подрабатываемой земной поверхности сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – К оценке достоверности и значимости закономерностей динамических сдвижений точек подрабатываемой поверхности

	Интервал изменения		
параметры и критерии		максимум	
Число пар наблюдений в одной статистической совокупности (n)	50	150	
Коэффициент корреляции при линейных зависимостях ( <i>r<sub>xy</sub></i> )	0,76	0,92	
Корреляционное отношение при нелинейных зависимостях ( <i>R<sub>yx</sub></i> )	0,78	0,96	
Коэффициент детерминации при линейных зависимостях ( $r_{xy}^2$ )	0,58	0,85	
Коэффициент детерминации при нелинейных зависимостях ( $R_{_{yx}}^2$ )	0,61	0,92	
Фактическое значение <i>t</i> -критерия Стьюдента ( <i>t</i> <sub>набл</sub> )	8,1	28,6	
Табличное значение <i>t</i> -критерия Стьюдента ( <i>t</i> <sub>табл</sub> )	1,976	2,011	
Фактическое значение <i>F</i> -критерия Фишера ( <i>F</i> )	65,6	815,5	
Табличное значение <i>F</i> -критерия Фишера ( <i>F</i> <sub>табл</sub> )	3,91	4,04	

Произведенная оценка (существенности) линейных значимости коэффициентов корреляции, корреляционных отношений и коэффициентов детерминации дает основание использовать результаты проведенных исследований для разработки методики прогноза ожидаемых динамических сдвижений точек подрабатываемой земной поверхности высокоскоростными механизированными очистными комплексами при разработке пологих И наклонных пластов Кузбасса.

# 3. ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ И ВЕРТИКАЛЬНЫХ СДВИЖЕНИЙ ОТДЕЛЬНЫХ ТОЧЕК ПОДРАБАТЫВАЕМОЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ПРОФИЛЬНЫХ ЛИНИЯХ ПО ПРОСТИРАНИЮ ЛАВ

### 3.1. Формирование динамической мульды сдвижений земной поверхности при разработке пологих и наклонных угольных пластов Кузбасса с

#### повышенными скоростями подвигания очистных забоев

На базе выполненных наблюдений автором исследованы особенности смещений отдельных точек земной поверхности при ее подработке высокоскоростными очистными забоями в условиях пологих и наклонных угольных пластов Кузбасса. Размер выработок в поперечном направлении составлял до 250м, при среднем  $D_1 = 232$ м.

В ходе исследований установлено, что проявление сдвижений на земной поверхности начинается не сразу после начала отработки лавы, а возникает после отхода очистного забоя от монтажной камеры в среднем на расстояние  $D_{2X} = 0.3H_{CP}$ , где  $D_{2X}$  – расстояние от монтажной камеры до линии очистного забоя, м;  $H_{CP}$  – средняя глубина разработки угольного пласта, м.

При дальнейшем движении очистного забоя со скоростью (*c*) размеры мульды в плане нарастают, оседания точек земной поверхности увеличиваются с достижением максимальных величин при отходе очистного забоя от монтажной камеры на расстояние  $D_{2x} = 1,6H_{CP}$ . Далее по мере подвигания забоя  $D_{2x} > 1,6H_{CP}$  изменений в профиле полумульды со стороны монтажной камеры практически не происходит, а полумульда со стороны демонтажной камеры движется вместе с очистным забоем, формируя «плоское дно» [71, 83, 108, 111].

Пример процесса развития сдвижений и деформаций, представленного частотными наблюдениями 3 – 29 на наблюдательной станции на шахте им. Кирова (лава 2452), показан на рис. 2.2 – 2.5. Заметим, что при монотонном росте
оседаний (рис. 2.2, 2.4) развитие горизонтальных сдвижений отдельных точек земной поверхности имеет более сложный характер, зависящий от их расположения относительно монтажной камеры (рис. 2.3, 2.5). Развитие горизонтальных сдвижений отдельных точек поверхности в динамике показано на примерах в [71, 111].

При последующем рассмотрении элементов мульды сдвижений сохраним терминологию А.С. Ягунова, введенную им в исследованиях: «динамическая микромульда - это мульда сдвижения в начале своего развития (от начала образования плоского дна)» [24]. возникновения до Микромульда ПО простиранию лавы разбивается на 2 полумикромульды: «полумульда позади забоя»  $L_{\Pi 3}$  – со стороны разрезной печи, «полумульда впереди забоя»  $L_{B3}$  – со стороны демонтажной камеры. Как будет показано далее, наблюдается несимметричность полумульд по простиранию – они отличаются по длине и крутизне, то есть, для полумульд существуют различия в функциях распределения сдвижений и деформаций.



Рисунок 3.1 - Формирование динамической микромульды

На рисунке 3.1 представлен процесс формирования динамической микромульды, при котором точка с максимальными текущими значениями оседаний  $\eta_i$  перемещается по наклонной траектории в сторону движения очистного забоя до положения  $\eta_{\text{max}}$ , которое достигается при отходе очистного забоя от монтажной камеры на расстояние  $D_{2X} = 1,6H_{CP}$  (завершение процесса формирования динамической микромульды).

В результате выполненных исследований выявлено, что окончательные максимальные оседания  $\eta_{\text{max}}$  по профильным линиям наблюдательных станций отличаются не более чем на 20% от максимальных оседаний, рассчитанных согласно «Правилам охраны...» [13], а изменение величины максимального оседания  $\eta_{\text{max}i}$  единичного наблюдения в процессе подвигания очистного забоя до конечных значений (3.1) и само движение точки максимального оседания в формирующейся микромульде (3.2) хорошо описываются с помощью обратных тригонометрических функций [110]:

$$\eta_{\max i} = \eta_{\max} \cdot \left[ -0.43 \cdot \operatorname{arcctg} \left( 4.739 \cdot \frac{D_{2X}}{H_{CP}} - 2.8 \right) + 1.089 \right]; \frac{D_{2X}}{H_{CP}} \in [0.3; 1.6] \quad (3.1)$$

$$l_{xi} = H_{CP} \cdot \left[ 0,107 \cdot arcctg \left( -5,528 \cdot \frac{D_{2X}}{H_{CP}} + 3,544 \right) + 0,129 \right]; \frac{D_{2X}}{H_{CP}} \in [0,3;1,6] \quad (3.2)$$

где  $\eta_{\max i}$  – величина текущего максимума оседаний в формирующейся динамической микромульде при отходе очистного забоя от монтажной камеры на расстояние, выраженное относительной величиной  $D_{2X}/H_{CP}$ ;

 $\eta_{\rm max}$  — максимальное оседание земной поверхности от ведения горных работ в конкретной лаве, зависящее от вынимаемой мощности и угла падения пласта, глубины разработки, коэффициентов подработанности по простиранию и вкрест простирания и определяемое по «Правилам охраны ...» [13]:

$$\eta_{\max} = q_0 \cdot m \cdot \cos \alpha \cdot N_1 \cdot N_2 \tag{3.3}$$

где: *q*<sup>0</sup> - относительное максимальное оседание. Для условий Кузбасса относительное максимальное оседание определяется по формуле:

$$q_0 = 0,7 + 0,25 \cdot \frac{H_{\Pi}}{H};$$

 $H_{\Pi}$  — мощность повторно подрабатываемых пород по линии  $\theta$ , соединяющей точку максимального оседания земной поверхности с серединой очистной выработки, от которой производится расчет деформаций, м;

H – мощность всей толщи по указанной линии  $\theta$ , для условий Кузбасса определяемая по формуле [13]:  $H = \frac{H_{CP}}{\sin(90^{\circ} - 0.5\alpha)}$ , м;

*m* – вынимаемая мощность пласта, м;

 $\alpha$  - угол падения пласта, град.;

*N*<sub>1</sub> и *N*<sub>2</sub> – коэффициенты подработанности.

 $l_{xi}$  – расстояние от монтажной камеры до текущего положения  $\eta_{\max i}$  в зависимости от положения очистного забоя  $D_{2X}/H_{CP}$ .

## 3.2. Выделение характерных зон подрабатываемой земной поверхности на профильных линиях по простиранию лав

На рисунке 3.2 на примере наблюдательной станции на шахте им. Кирова вертикальные и горизонтальные составляющие вектора сдвижений точек земной поверхности представлены в координатной плоскости  $\eta_x 0\xi_x$ , где положительными значениями  $\xi_x$  характеризуются горизонтальные перемещения точек в направлении подвигания забоя, а отрицательными – в обратном направлении. Вертикальные составляющие сдвижений (оседания  $\eta_x$ ) приняты со знаком минус. Выявленные особенности сдвижений отдельных точек земной поверхности позволяют выделить четыре характерные зоны сдвижений формирующейся мульды сдвижений: **А**, **В**, **С** и **D** (рис. 3.4).

В зоне сдвижений **A** точки земной поверхности при формировании мульды «оседают» и одновременно сдвигаются в горизонтальном направлении в сторону движения очистного забоя (рис. 3.2  $a, \delta, \beta$ ). Оседания каждой точки достигают своих максимальных динамических величин при положении очистного забоя  $D_{2x} = 1,6H_{CP}$ , а максимальные горизонтальные сдвижения достигаются несколько ранее. Конечный этап смещения рассматриваемых точек характеризуется их движением только по вертикали. Таким образом, точки земной поверхности, расположенные в зоне **A**, при подработке высокоскоростными забоями описывают III и IV части траектории, предложенной Авершиным С.Г. (рис. 1.20).

Зона сдвижений В характеризуется монотонным оседанием точек земной поверхности и их 2-х этапным возвратно-поступательным движением в горизонтальном направлении (рис. 3.2 г, д). По горизонтали точки сначала сдвигаются в сторону монтажной камеры до определенных величин (этап 1), после чего наблюдается процесс их сдвижения в противоположном направлении (этап 2). При этом с удалением точки поверхности от монтажной камеры величина ее горизонтального сдвижения в сторону обратную направлению подвигания забоя (на этапе 1) увеличивается, а в сторону, совпадающую с направлением подвигания (на этапе 2) - уменьшается. Из полученных данных и рисунков следует, что величина горизонтального сдвижения R26 (рис. 3.2 г) в направлении подвигания составляет 94мм, а в направлении обратном подвиганию - 177мм, при этом горизонтальное сдвижение R23 в указанных направлениях составляет соответственно 228мм и 14мм. В краевой части зоны В окончательные горизонтальные сдвижения точек незначительны по величине по сравнению с их промежуточными значениями, а общее смещение точек относительно их начального положения происходит в сторону подвигания забоя. Таким образом, земной поверхности расположенные зоне B точки В при подработке высокоскоростными забоями описывают I и III части обобщенной траектории С.Г. Авершина. IV часть траектории – оседание под действием уплотнения подработанных пород – была зафиксирована при последних измерениях, проведенных на наблюдательной станции после 8-ми месячного перерыва.

Отличительной чертой зоны сдвижения C также является 2-х этапное возвратно-поступательное движение точек земной поверхности в горизонтальном направлении с монотонным ростом оседаний (рис. 3.2 е). Из рисунков 3.2 е и 3.2 д следует, что, несмотря на некоторые количественные отличия между величинами оседаний и горизонтальных сдвижений точек земной поверхности в зонах B и C, характер их движения в плоскости  $\eta_x 0\xi_x$  один и тот же с единственным отличием – конечное горизонтальное смещение точек зоны C относительно их начального положения происходит в сторону обратную направлению подвигания забоя.

76

Таким образом, при подработке высокоскоростными забоями точки земной поверхности зоны C двигаются по тем же частям обобщенной траектории, что и точки предыдущей зоны, но при этом III часть траектории вырождается.



Рисунок 3.2 - Характер смещений точек земной поверхности в плоскости оседаний и горизонтальных сдвижений η<sub>x</sub>0ξ<sub>x</sub> при формировании мульды сдвижений

По мере дальнейшего удаления наблюдаемых точек поверхности от монтажной камеры III часть траектории полностью вырождается. Остановок лавы в положении забоя  $D_{2x} = 1,6H_{CP}$  для понимания характера сдвижения в зоне **D** не производилось, однако характер сдвижения точек в этой части мульды может быть смоделирован мысленной остановкой забоя в положении  $D_{2x} = 1,6H_{CP}$  и визуальным представлением сдвижения отдельной точки в плоскости  $\eta_x 0\xi_x$ . При этом точки подрабатываемой земной поверхности опишут I часть обобщенной траектории С.Г. Авершина с ее вырождением в нулевую на границе мульды (рис. 3.2, 3.3).

Наличия участка II, который согласно исследований С.Г. Авершина [81], образуется в момент прохождения забоя под наблюдаемой точкой и характеризуется процессом только оседания (без горизонтальных сдвижений) в процессе проводимых наблюдений за подработкой земной поверхности высокоскоростными лавами не установлено.



Рисунок 3.3 - Развитие вертикальных и горизонтальных сдвижений в краевой части сформированной динамической микромульды (зона **D**) при остановке забоя в положении  $D_{2X} = 1,6H_{CP}$ 

Размеры зон сдвижения **A**, **B**, **C** и **D** в сформированной микромульде по направлению движения очистного забоя можно определить по граничным углам  $\delta_0, \delta'_0, \varphi_0$  и углам  $\delta_A, \delta_B, \delta_C$  и  $\delta_D$  (рис. 3.4) по формулам:

$$L_{A} = H_{CP} \cdot ctg\delta_{A} + (H_{CP} - h_{H}) \cdot ctg\delta_{0} + h_{H} \cdot ctg\varphi_{0}$$

$$L_{B} = H_{CP} \cdot (ctg\delta_{B} - ctg\delta_{A})$$

$$L_{C} = H_{CP} \cdot (ctg\delta_{C} - ctg\delta_{D})$$

$$L_{D} = H_{CP} \cdot ctg\delta_{D} + (H_{CP} - h_{H}) \cdot ctg\delta_{0}' + h_{H} \cdot ctg\varphi_{0}$$
(3.4)

Исследованиями А.С. Ягунова [24] установлено, что динамический граничный угол со стороны монтажной камеры равен  $\delta_0'=77^{\circ}$ . В дальнейшем он выполаживается до  $\delta_0 = 70^{\circ}$ , то есть, до величин, указанных в таблицах «Правил охраны…» [13].

По результатам наших исследований средние значения эмпирических углов  $\delta_A$ ,  $\delta_B$ ,  $\delta_C$  и  $\delta_D$  необходимых для расчета размеров зон сдвижения равны:  $\delta_A = 73^\circ$ ,  $\delta_B = 43^\circ$ ,  $\delta_C = 60^\circ$  и  $\delta_D = 83^\circ$ . Граничные углы в наносах определяются в зависимости от степени их обводненности:  $\varphi_0 = 45^\circ$ - в сухих и нормальной влажности;  $\varphi_0 = 30^\circ$  - в обводненных и плывунах. С учетом, что мощность наносов много меньше глубины отработки ( $h_H << H_{CP}$ ), а также приведенных значений эмпирических и граничных углов и формул (3.4) размеры зон сдвижения составляют:

$$L_A \approx 0.67 \cdot H_{CP}; \ L_B \approx 0.77 \cdot H_{CP}; \ L_C \approx 0.45 \cdot H_{CP}; \ L_D \approx 0.35 \cdot H_{CP}$$
 (3.5)

Зона сдвижений **A** в динамической микромульде расположена в полумульде «позади забоя», зона сдвижения **B** – в обеих полумульдах, зоны сдвижения **C** и **D** - в полумульде «впереди забоя».

Длины полумульд «позади забоя» и «впереди забоя» могут быть определены через средние динамические углы полных сдвижений, которые по

нашим оценкам равны: со стороны монтажной камеры  $\psi_{3M}'=60,3^{\circ}$ , со стороны демонтажной камеры  $\psi_{3M}'=44,2^{\circ}$ .

$$L_{\Pi 3} = H_{CP} \cdot ctg\psi_{3M'} + (H_{CP} - h_H) \cdot ctg\delta_0 + h_H \cdot ctg\phi_0$$
  
$$L_{B3} = H_{CP} \cdot ctg\delta_{3\mathcal{A}'} + (H_{CP} - h_H) \cdot ctg\delta_0' + h_H \cdot ctg\phi_0$$
(3.6)

Подставляя значения углов и с учетом  $h_{H} << H_{CP}$ , получаем:

$$L_{II3} \approx 0.94 \cdot H_{CP}; \ L_{B3} \approx 1.30 \cdot H_{CP}$$
 (3.7)



Рисунок 3.4 – Зоны сдвижения **A**, **B**, **C** и **D** в сформированной микромульде при положении очистного забоя  $D_{2X} = 1,6H_{CP}$ 

Таким образом, между длинами полумульд «позади забоя» и «впереди забоя» имеются существенные отличия в длине и крутизне, и, следовательно, функции распределения величин сдвижений и деформаций в абсолютных величинах для полумульд также различаются.

При дальнейшем развитии мульды сдвижения  $D_{2x} > 1,6H_{CP}$  зона **В** увеличивается в размерах с образованием плоского дна, а зоны **С** и **D** движутся вместе с очистным забоем вплоть до образования полной мульды сдвижений  $L_3$ . Точки земной поверхности, расположенные в сформировавшейся полумульде впереди забоя, и точки, затрагиваемые ее движением, будут иметь одинаковую

закономерность сдвижений, которая отображена на рисунке 3.5. На всех других наблюдательных станциях характер взаимосвязи вертикальных и горизонтальных сдвижений точек поверхности аналогичен рассмотренным, и после приведения оседаний  $\eta_x$  и горизонтальных сдвижений  $\xi_x$  к безразмерным величинам делением их на величину  $\eta_{max}$ , определенную в каждой наблюдательной станции данные наблюдений могут быть рассмотрены как единая статистическая совокупность.



Рисунок 3.5 - Развитие вертикальных и горизонтальных сдвижений точек подрабатываемой земной поверхности (Зона С), приведенная к единой статистической совокупности.

# 3.3. Закономерности развития оседаний точек подрабатываемой земной поверхности на профильных линиях по простиранию лав. Влияние скорости подвигания очистного забоя

Рассмотрим закономерности изменения оседаний точек земной поверхности в характерных зонах **A**, **B**, **C** и **D** в зависимости от текущего положения очистного забоя (*lt*) на интервале  $D_{2X} = 1,6H_{CP}$ . Исходные данные инструментальных наблюдений представим в нормализованном виде, переход к которым осуществляется с использованием линейной нормализации в пределах изменения переменных [0, 1] по формуле:

$$x_{\mu i k} = \frac{x_{i k} - x_{\min k}}{x_{\max k} - x_{\min k}}, i = 1, 2, ..., n; k = 1, 2, ..., N$$
(3.8)

где  $x_{ik}$ ,  $x_{nik}$  — значения переменной в традиционном измерении и в нормализованном виде в k-той выборке;  $x_{mink}$ ,  $x_{maxk}$  — минимальное и максимальное значения переменной в k-той выборке; n — число данных в k-той выборке; N — число выборок.

Функции распределения оседаний в характерных зонах  $S_{\eta,x_3}(lt)$  представлены отношениями:

$$S_{\eta,x_3}(lt) = \frac{\eta_{x_3,ri,lt,k}}{\eta_{x_3,\max_ri,Lt,k}}$$
(3.9)

где  $\eta_{x_3,ri,lt,k}$  – текущие значения наблюдаемых оседаний в характерных зонах (x3) отдельных точек поверхности (реперов ri) в продольной профильной линии kтой наблюдательной станции в моменты положения очистного забоя (*lt*);  $\eta_{x_3,max,ri,Lt,k}$  – максимальные оседания реперов (ri), достигаемые при положении очистного забоя  $D_{2X} = 1,6H_{CP}$ , которое в нормализованном виде имеет значение Lt=1. Корреляционные поля исследуемых величин представлены на рис. 3.6. Здесь начало сдвижения каждого репера в характерных зонах помещено в начало координат.

Рассмотрим подробнее введенную нами в анализируемый процесс сдвижений переменную величину – нормализованное относительное положение очистного забоя (*lt*) при его прохождении под точками подрабатываемой земной поверхности.

Как уже было сказано в разделе 3.1, оседания точек земной поверхности, расположенных в главном сечении по простиранию, начинаются в некоторый момент  $t_1$  при отходе очистного забоя на расстояние  $D_{2X} = 0.3 H_{CP}$  от положения

монтажной камеры и практически достигают максимальных значений в момент  $t_2$  при отходе  $D_{2x} = 1,6H_{CP}$ . Общее относительное расстояние подвигания очистного забоя под профильной линией за период  $t_2 - t_1$ , при котором происходит активное сдвижение точек поверхности, равное  $1,3H_{CP}$  (средняя величина, определенная по всем наблюдательным станциям) принято за нормализованный интервал изменения [0; 1], который будем обозначать символом (*Lt*). При этом нормализованное относительное положение очистного забоя (*lt*) в произвольный момент времени  $t \in [t_1; t_2]$  в соответствии с (3.8) составит:



$$lt = \frac{D_{2X} - 0.3H_{CP}}{1.3H_{CP}}$$

Рисунок 3.6 - Функции распределения оседаний отдельных точек подрабатываемой земной поверхности в продольном сечении лавы в характерных зонах сдвижений A, B, C, D в зависимости от положения очистного забоя относительно монтажной камеры.

Функции распределения оседаний, представленные на рисунке 3.6, аппроксимированы выражениями:

$$S_{\eta,A} = 1 - e^{-t/t}$$

$$S_{\eta,B} = 0,362 \cdot arcctg(-13,3 \cdot lt + 3,5) - 0,1$$

$$S_{\eta,C} = 0,37 \cdot arcctg(-10 \cdot lt + 4,1) - 0,09$$

$$S_{\eta,D} = 0,03 \cdot e^{3,536 \cdot lt} - 0,03$$
(3.10)

Максимальные оседания точек поверхности в выражении (3.9) зависят от их положения в мульде сдвижения. Распределение максимальных оседаний  $S_{\eta i, max}$  на интервале  $D_{2X} = 1,6H_{CP}$  (то есть, в сформировавшейся динамической микромульде) установим по данным инструментальных наблюдений для обеих ветвей микромульды: «*позади забоя*»  $l_{\Pi 3}$  и «*впереди забоя*»  $l_{B 3}$ .

Функции  $S_{\eta i,max}(l_{II3}), S_{\eta i,max}(l_{B3})$  выражены соотношениями:

$$S_{\eta i,\max}(l_{H\Pi 3}) = \frac{\eta_{\Pi 3,\max,ri,Lt,k}}{\eta_{\max,k}}; S_{\eta i,\max}(l_{HB3}) = \frac{\eta_{B3,\max,ri,Lt,k}}{\eta_{\max,k}} \text{ при}$$
(3.11)  
$$l_{H\Pi 3} \in [0;1]; l_{HB3} \in [1;2]$$

где:  $l_{HII3} = \frac{l_{II3}}{L_{II3}}$ ,  $l_{HB3} = \frac{l_{B3}}{L_{B3}}$  – текущие относительные (нормализованные)

координаты расчетной точки в полумульдах позади и впереди забоя,  $l_{\Pi 3}$ ,  $l_{B3}$  – расстояние от начала полумульды до расчетной точки.

Величины  $L_{\Pi 3}$  и  $L_{B3}$  определяются через средние динамические углы полных сдвижений  $\Psi_{3M}'$  и  $\Psi_{3d}'$  (рис. 3.4). Начало отсчета  $l_{\Pi 3}$  принято со стороны монтажной камеры, а  $l_{B3}$  – от максимального оседания динамической микромульды;  $\eta_{max,k}$  – наблюдаемое максимальное оседание динамической мульды сдвижения в k-той наблюдательной станции, прогнозная оценка которого производится по формуле «Правил охраны…» (3.3). Исследованиями установлено, что функция распределения  $S_{\eta i,max}(l_{\Pi 3})$  в полумульде позади забоя с ростом скорости подвигания очистного забоя практически не изменяется и выражена эмпирической зависимостью:

$$S_{\eta i,\max}(l_{\Pi 3}) = 0,382 \cdot arcctg(-8,045 \cdot l_{\Pi 3} + 4,25) - 0,089$$
(3.12)

Функция  $S_{\eta i,max}(l_{B3})$  изменяется при возрастании скорости подвигания очистного забоя лавы. Для точек, расположенных в полумульде со стороны демонтажной камеры, увеличение скорости подвигания забоя уменьшает динамические оседания этих точек (рис. 3.7). Установлены эмпирические зависимости:

$$S_{\eta i, \max}(l_{B3}) = 0,392 \cdot arcctg(7,487 \cdot l_{B3} - 11,35) - 0,118$$
 при  $V_{O3} = 5$  м/сутки  
 $S_{\eta i, \max}(l_{B3}) = 0,395 \cdot arcctg(7,17 \cdot l_{B3} - 10,468) - 0,111$  при  $V_{O3} = 10$  м/сутки (3.13)  
 $S_{\eta i, \max}(l_{B3}) = 0,42 \cdot arcctg(5,566 \cdot l_{B3} - 7,370) - 0,107$  при  $V_{O3} = 15$  м/сутки



Рисунок 3.7 - Функции распределения максимальных оседаний точек поверхности в главном сечении по простиранию лавы в сформировавшейся микромульде при разных скоростях подвигания очистного забоя.

Из анализа рисунка 3.7 и оценок, выполненных по формулам 3.13, следует, что при росте скорости подвигания от 5 до 15м/сутки максимальное снижение величины динамического оседания точки (до 2,4 раз) наблюдается в средней части полумульды «впереди забоя».

Следует добавить, что конечные величины оседаний, соответствующие окончанию общей продолжительности процесса сдвижения, как показали инструментальные наблюдения, от скорости подвигания практически не зависят и определяются размерами в плане и глубиной подземной выработки, а также углом залегания и вынимаемой мощностью угольного пласта.

Таким образом, рост скорости подвигания очистного забоя существенного влияния на конечные величины деформаций земной поверхности не оказывает, а лишь уменьшает их промежуточные динамические значения в полумульде со стороны демонтажной камеры, т.е. увеличение скорости меняет интенсивность протекания процесса сдвижения в полумульде «впереди забоя».

## 3.4. Аналитические представления взаимосвязи оседаний и горизонтальных сдвижений отдельных точек на профильных линиях по простиранию лав

Функции взаимосвязи оседаний и горизонтальных сдвижений отдельных точек по простиранию лав могут быть установлены путем подбора аппроксимирующих функций по графическому представлению корреляционных полей пар оседаний и горизонтальных сдвижений отдельных точек в нормализованных величинах и дальнейшим нахождением эмпирических коэффициентов этих функций [113].

На рисунке 3.8 оседания выражены в относительных величинах η<sub>i</sub>/η<sub>max</sub>, где η<sub>max</sub> - максимальное оседание в сформировавшейся динамической мульде, прогнозное значение которого определяется выражением (3.3). Горизонтальные сдвижения выражены в долях максимального оседания, начало отсчета со стороны монтажной камеры, сдвижения в сторону демонтажной камеры приняты положительными, в сторону монтажной камеры - отрицательными.

Зона А примечательна тем, что при подвигании очистного забоя от монтажной камеры до образования плоского дна (lt = 1, то есть при  $D_{2X} = 1,6H_{CP}$ ), все точки поверхности этой зоны при оседании с закономерностью  $S_{n,A}(lt)$ 

сдвигаются в сторону демонтажной камеры. При этом отношение  $\xi_i/\eta_i$  в каждом единичном наблюдении возрастает до определенной величины и остается практически постоянным до образования плоского дна динамической мульды (рис. 3.9). Чем ближе точка поверхности к началу зоны **A**, тем больше отношение  $\xi_i/\eta_i$ . В крайних точках горизонтальные сдвижения могут превышать оседания этих точек ( $\xi_i/\eta_i > 1$ ).

Установим аналитические зависимости горизонтальных сдвижений отдельных точек поверхности от изменения их оседаний в процессе движения очистного забоя.

В зоне А эти зависимости имеют экспоненциальный вид (рис. 3.8 *a*) и могут быть описаны выражением:

$$\xi_{A}(\eta_{A}) = a_{0} \cdot e^{a_{1} \cdot \eta_{A}} - a_{0} \tag{3.14}$$

где  $\xi_A$  – определяемая относительная ( $\xi_i/\eta_{max}$ ) переменная горизонтальных сдвижений в зоне **A**;  $\eta_A$  – независимая относительная ( $\eta_i/\eta_{max}$ ) переменная оседаний в зоне **A**;  $a_0$ ,  $a_1$  – эмпирические коэффициенты.

Обозначим текущее положение отдельных точек поверхности в нормализованной длине ( $L_{A_H} = 1$ ) зоны **A** через  $l_{A_H}$ . Из базы данных инструментальных наблюдений выберем парные значения оседаний и горизонтальных сдвижений для близлежащих точек поверхности (реперов) за время формирования динамической микромульды, в результате чего получим корреляционное поле данных, пример которого показан на рисунке 3.10. Методом наименьших квадратов для выбранных точек находим значения эмпирических коэффициентов  $a_0, a_1$ .

Выбранные точки поверхности, положение которых в зоне A определяется значением величины  $l_{A_{H}}$ , и эмпирические коэффициенты выражения (3.14) приведены в таблице 3.1.

Значения выражения (3.14) для промежуточных точек таблицы 3.1 определяются методом интерполяции.

88



Рисунок 3.8 - Примеры характера взаимосвязи горизонтальных сдвижений и оседаний отдельных точек земной поверхности на наблюдательных станциях шахт им. Кирова и Котинская в характерных зонах динамической мульды сдвижений: *a*) в зоне **A**; *б*) в зоне **B**; *в*) в зоне **C**; *г*) в зоне **D** 



Рисунок 3.9 - Пример изменения соотношения ξі/ηі в характерной зоне A при формировании микромульды сдвижения поверхности на шахте им. Кирова, лава 2452



Рисунок 3.10 - Пример корреляционного поля инструментальных наблюдений относительных оседаний и горизонтальных сдвижений отдельных точек подрабатываемой поверхности в интервале [0; 0,6] нормализованной длины  $l_{A_H}$  зоны **A** 

Таблица 3.1 - Эмпирические коэффициенты  $a_0$ ,  $a_1$  выражения (3.14) в отдельных интервалах  $l_{A_H}$  зоны **А** 

Интервал зоны <i>l</i> <sub>Ан</sub>	Интервал оседаний	Эмпирические коэффициенты		
		$a_0$	$a_1$	
0 ÷ 0,365	$0 \div 0,05$	0,082	14,737	
$0,365 \div 0,55$	$0 \div 0,106$	0,040	14,693	
$0,55 \div 0,70$	0 ÷ 0,19	0,034	9,773	
$0,70 \div 0,85$	$0 \div 0,348$	0,025	7,500	
$0,85 \div 0,88$	$0 \div 0,\!40$	0,031	5,660	
$0,88 \div 0,92$	$0 \div 0,456$	0,029	5,180	
$0,92 \div 0,95$	$0 \div 0,50$	0,028	4,400	
$0,95 \div 1,0$	$0 \div 0,80$	0,027	3,500	

Зона **В** характеризуется тем, что при развитии процесса оседаний по закономерности, приведенной на рисунке 3.6  $\delta$ , точки поверхности сначала сдвигаются в сторону монтажной камеры до некоторой максимальной величины, а затем начинают сдвигаться в сторону демонтажной камеры (рис. 3.8  $\delta$ ). Аналитически этот процесс сдвижений можно представить зависимостью горизонтальных сдвижений точек от их оседаний до максимального значения экспонентой вида (3.15), а после максимального горизонтального сдвижения экспонентой вида (3.16):

$$\xi_{B}(\eta_{B}) = a_{0} \cdot e^{-a_{1} \cdot \eta_{B}} - a_{0}$$
(3.15)

$$\xi_B(\eta_B) = a_0 \cdot e^{a_1 \cdot \eta_B} - a_2 \tag{3.16}$$

Используя методический подход определения эмпирических коэффициентов в зоне **A**, найдены таковые и для зон **B**, **C** и **D** (табл. 3.2, 3.3).

Таблица 3.2 - Эмпирические коэффициенты  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  выражений (3.15) и (3.16) в отдельных интервалах  $l_{B_H}$  зоны **В** 

1.	Сдвиже монта:	ение в стој жной каме	рону сры	Сдвижение в сторону демонтажной камеры				
зоны <i>l</i> <sub>Вн</sub>	Интервал	Интервал коэффии		Интервал	Эмпирические коэффициенты			
	оседании	$a_0$	$a_1$	оседании	$a_0$	$a_1$	$a_2$	
В полумульде $L_{\Pi 3}$								
0÷0,04	$0 \div 0,2$	0,013	10,31	$0,2 \div 0,80$	0,001	7,9	0,016	
0,04÷0,17	$0 \div 0,3$	0,051	6,413	$0,3 \div 0,9$	0,001	6,3	0,051	
0,17÷0,3	$0 \div 0,\!4$	0,08	8,8	$0,\!4 \div 0,\!95$	0,001	5,6	0,087	
0,3÷0,45	$0 \div 0,\!45$	0,163 8,1		$0,\!45 \div 0,\!98$	0,003	4,33	0,18	
В плоском дне								
<i>L<sub>П.ДНО</sub></i>	$0 \div 0,5$	0,202	9,35	$0,5 \div 1,0$	0,003	4,322	0,225	
${ m B}$ полумульде $L_{B3}$								
0,45÷0,7	$0 \div 0,\!48$	0,163	8,1	$0,\!48 \div 0,\!725$	0,003	4,15	0,182	
0,7÷1,0	$0 \div 0,45$	0,13	7,1	$0,\!45 \div 0,\!70$	0,002	4,40	0,138	

Зона	Сдвиже монта:	ение в стој кной каме	рону еры	Сдвижение в сторону демонтажной камеры				
	Интервал оседаний	Эмпирические коэффициенты		Интервал	Эмпирические коэффициенты			
		$a_0$	a1	оседании	$a_0$	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	
Зона С	$0 \div 0,\!45$	0,13	7,1	$0,\!45 \div 0,\!70$	0,002	4,40	0,138	
Зона D	$0 \div 0,45$	0,13	7,1	-	_	-	-	

Таблица 3.3 - Эмпирические коэффициенты *a*<sub>0</sub>, *a*<sub>1</sub>, *a*<sub>2</sub> выражения (3.15) и (3.16) в зонах **С** и **D** 

Аналитические зависимости (3.14), (3.15) и (3.16) с учетом найденных эмпирических коэффициентов для выделенных характерных зон (табл. 3.1, 3.2, 3.3) отражают взаимосвязь оседаний и горизонтальных сдвижений точек подрабатываемой земной поверхности.

Исходя из вышеизложенного, горизонтальные сдвижения произвольной точки поверхности на профильной линии по простиранию в зависимости от положения очистного забоя могут быть определены через динамическое оседание этой точки.

#### 3.5. Выводы по главе

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- формирование динамической микромульды сдвижений (мульды в начале своего развития до образования плоского дна) на подрабатываемой земной поверхности начинается при отходе механизированного высокоскоростного очистного забоя на расстояние  $D_{2x} = 0,3H_{CP}$  от монтажной камеры; достижение полных сдвижений происходит на расстоянии  $D_{2x} = 1,6H_{CP}$ . При дальнейшем отходе забоя  $D_{2x} > 1,6H_{CP}$  изменений в полумульде со стороны монтажной камеры практически не происходит, а полумульда со стороны демонтажной камеры движется вместе с очистным забоем с образованием «плоского дна».

- вертикальная составляющая сдвижений каждой точки динамической микромульды в процессе ее формирования монотонно возрастает до

максимальных значений, соответствующих положению очистного забоя  $D_{2x} = 1,6H_{CP}$ , а характер изменения горизонтальной составляющей зависит от положения этой точки в мульде.

- максимальное оседание земной поверхности в динамической мульде сдвижения при высоких скоростях подвигания забоя с достаточной точностью определяется выражением (3.3), установленным «Правилами охраны…» [13]. При этом рост величины максимальных оседаний в единичных наблюдениях до своего конечного значения и кривая движения точек максимальных оседаний хорошо аппроксимируются обратными тригонометрическими функциями (3.1), (3.2).

- в сформированной динамической микромульде при  $D_{2x} = 1,6H_{CP}$  по простиранию лавы выделены четыре зоны с разным характером сдвижений отдельных точек земной поверхности (рис. 3.4). Размеры выделенных зон, обозначенных буквами латинского алфавита **A**, **B**, **C** и **D**, определяются эмпирическими углами:  $\delta_A$ ,  $\delta_B$ ,  $\delta_C$ ,  $\delta_D$  и граничными углами:  $\delta_0$ ,  $\delta'_0$ ,  $\varphi_0$  и вычисляются по формулам (3.4). С учетом найденных значений углов и принятых допущений размеры зон сдвижения составляют:  $L_A \approx 0,67 \cdot H_{CP}$ ;  $L_B \approx 0,77 \cdot H_{CP}$ ;  $L_C \approx 0,45 \cdot H_{CP}$ ;  $L_D \approx 0,35 \cdot H_{CP}$ .

- ветви сформированной динамической микромульды по простиранию несимметричны: они имеют различия по длине, крутизне, а, также функциям распределения сдвижений и деформаций. Длины полумульд «позади забоя» и «впереди забоя» по нашим исследованиям определяются по формулам (3.6) и с учетом допущений составляют:  $L_{\Pi 3} \approx 0.94 \cdot H_{CP}$ ;  $L_{B3} \approx 1.30 \cdot H_{CP}$ .

- при подвигании забоя  $D_{2x} > 1,6H_{CP}$  и образовании «плоского дна» зона **В** увеличивается в размерах, а зоны **С** и **D** движутся вместе с подвиганием очистного забоя вплоть до образования полной мульды сдвижений. Точки земной поверхности, расположенные в сформировавшейся полумульде впереди забоя, а также новые точки, вовлекаемые в процесс сдвижения, имеют одинаковую закономерность развития оседаний и горизонтальных сдвижений (рис. 3.5).

- максимальные оседания отдельных точек на разрезе по простиранию лавы, соответствующие окончанию периода формирования динамической мульды, зависят от их положения на профильной линии и могут быть определены в полумульдах со стороны монтажной и демонтажной камер зависимостями (3.12), (3.13). Оседания точек полумульды со стороны монтажной камеры не зависят от скорости подвигания очистного забоя. Для точек, расположенных в полумульде со стороны демонтажной камеры, увеличение скорости подвигания забоя уменьшает динамические оседания подрабатываемой поверхности (рис. 3.7).

- конечные величины оседаний, соответствующие окончанию общей продолжительности процесса сдвижения от скорости подвигания практически не зависят и определяются размерами в плане и глубиной подземной выработки, а также углом залегания и вынимаемой мощностью угольного пласта. То есть, рост скорости подвигания очистного забоя не оказывает существенного влияния на окончательные величины деформаций земной поверхности, а лишь уменьшает ИХ динамические промежуточные значения В полумульде co стороны демонтажной камеры, т.е. в полумульде «впереди забоя» меняется интенсивность протекания процесса сдвижения.

- оседание произвольной точки поверхности на профильной линии вдоль простирания в зависимости от положения очистного забоя для выделенных ранее характерных зон может быть определено по формулам (3.10).

- предложенные эмпирические зависимости (3.14), (3.15) и (3.16) с учетом найденных коэффициентов (табл. 3.1, 3.2, 3.3) для выделенных характерных зон **A**, **B**, **C** и **D** отражают взаимосвязь оседаний и горизонтальных сдвижений точек подрабатываемой земной поверхности по простиранию лавы.

- горизонтальное сдвижение произвольной точки поверхности на профильной линии по простиранию в зависимости от положения очистного забоя может быть определено через динамическое оседание этой точки и функции взаимосвязи вертикальных и горизонтальных сдвижений (3.14), (3.15) и (3.16).

### 4. ЗАКОНОМЕРНОСТИ И АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ОСЕДАНИЙ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СДВИЖЕНИЙ ТОЧЕК НА ПРОФИЛЬНЫХ ЛИНИЯХ ВКРЕСТ ПРОСТИРАНИЯ ЛАВ ОТ ПОЛОЖЕНИЯ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

## 4.1. Выделение характерных зон подрабатываемой земной поверхности на профильных линиях вкрест простирания лав

Исследованиями [83, 105, 106, 107, 112] установлены закономерности сдвижений отдельных точек подрабатываемой земной поверхности при отработке пологих и наклонных пластов Кузбасса высокоскоростными забоями. Выявлено, что при прохождении очистного забоя под точками земной поверхности траектории их движения вдоль направления подвигания забоя и вкрест подвигания значительно отличаются друг от друга.



Рисунок 4.1 – Характер сдвижения реперов, расположенных на пересечении профильных линий вдоль лавы (1) и в поперечном сечении (2) наблюдательных станций: *а*) на шахте «Грамотеинская», лава 631 по пласту Сычевский III (II); *б*) на шахте им. Кирова, лава 2542 по пласту Болдыревский-24

Разный характер сдвижений по простиранию и вкрест простирания лав при формировании динамической мульды показан на рисунке 4.1 на примере реперов,

расположенных на пересечении профильных линий наблюдательных станций на шахтах «Грамотеинская» и им. Кирова. Кривые 1 характеризуют положения репера в плоскости η0ξ вертикальных (оседаний η) и горизонтальных (ξ) сдвижений в моменты (t) в направлении подвигания очистного забоя лавы при его прохождении под исследуемой точкой от монтажной камеры до демонтажной за общее время (T), кривые 2 – в направлении перпендикулярном к подвиганию забоя (вкрест простирания лавы). Оседания и горизонтальные сдвижения реперов приведены в относительных величинах, переход к которым от традиционных осуществлен их делением на максимальную величину оседаний. Как уже было сказано в предыдущем разделе, данный подход позволяет привести значения оседаний и горизонтальных сдвижений разных наблюдательных станций к одинаковой области их изменения, благодаря чему появляется возможность в дальнейшем рассматривать их вместе как единую статистическую совокупность.

Из рисунка 4.1 следует, что развитие смещений точек земной поверхности вкрест простирания лавы происходит с монотонным ростом оседаний и горизонтальных сдвижений (кривые 2), а в направлении подвигания очистного забоя наблюдается возвратно-поступательное движение (кривые 1) [106]. Монотонный характер развития оседаний и горизонтальных сдвижений в процессе формирования динамической мульды наблюдается и у остальных реперов профильной линии вкрест простирания. Результаты инструментальных наблюдений за оседаниями и горизонтальными сдвижениями отдельных точек земной поверхности (реперов) вкрест простирания при прохождении очистных забоев лав под поперечными профильными линиями представлены на рисунке 4.2. Величины сдвижений координатной приведены на плоскости В относительном виде, положительные значения горизонтальных сдвижений приняты в направлении восстания. Точки поверхности, расположенные в полумульде по падению, при последовательном оседании сдвигаются в сторону восстания, а точки поверхности, расположенные в полумульде по восстанию, сдвигаются в сторону падения.

95

Из анализа рисунка 4.2 следует, что во время всей продолжительности формирования динамической мульды сдвижения зависимость между горизонтальными сдвижениями и оседаниями отдельной точки поверхности близка к линейной, а для крайних реперов наблюдательных станций – она и вовсе идентична.



Рисунок 4.2 - Сдвижения реперов поперечных профильных линий при прохождении под ними очистных забоев: *a*) на шахте «Грамотеинская»; *б*) на шахте им. Кирова

При детализации установлено, что в краевых частях мульды сдвижения на формирования оседаний начальном этапе ee при малых значениях И горизонтальных сдвижений по абсолютной величине (рис. 4.3) соотношение между ними варьируется во времени в очень широких пределах [107]. Горизонтальные сдвижения точек поверхности, расположенных в краевых частях мульды, в единичных наблюдениях могут значительно превышать ИХ смещения (рис. 4.3 б). При вертикальные проведенных анализе всех наблюдений инструментальных отмечалось шестикратное превышение горизонтальных сдвижений над оседаниями.

В средней части мульды движение точек поверхности сопровождается небольшим изменением соотношения между горизонтальными и вертикальными сдвижениями во времени. Чем ближе точка поверхности к краевой части мульды, тем больше это соотношение (рис. 4.4).



Рисунок 4.3 - Динамика отношений горизонтальных сдвижений к вертикальным точек поверхности (отдельных реперов) в единичных наблюдениях в краевых частях динамической мульды: *a*) в полумульде по падению; *б*) в полумульде по восстанию



Рисунок 4.4 - Динамика отношений горизонтальных сдвижений к вертикальным точек поверхности (отдельных реперов) в единичных наблюдениях в средней части динамической мульды

Анализ инструментальных наблюдений, проведенных на других шахтах Кузбасса, показал аналогичную динамику процесса сдвижений, представленную на рисунках 4.2, 4.3, 4.4, что позволяет выявить эмпирические зависимости между оседаниями и горизонтальными сдвижениями отдельных точек подрабатываемой земной поверхности в поперечном направлении лавы.

В процессе исследований выявлено, что закономерность развития оседаний всех точек земной поверхности в средней части мульды сдвижений во времени одинакова (рис. 4.5 б), и её можно описать функцией распределения в зависимости от положения очистного забоя под исследуемой точкой. Эта закономерность отличается от закономерности движения точек в краевых частях мульды (рис. 4.5 а).



Рисунок 4.5 - Закономерность оседаний во времени отдельных точек поверхности в полумульде по падению в поперечной профильной линии на шахте им. Кирова: *а*) в краевой части полумульды; *б*) в средней части полумульды

Учитывая наблюдаемые особенности процесса сдвижения отдельных точек поверхности в поперечном сечении лавы, целесообразно выделить в полумульдах по падению и восстанию краевые и средние зоны для установления в них зависимостей между горизонтальными сдвижениями и оседаниями, а также оседаниями и подвиганием очистного забоя, выраженными в аналитической форме. Нашими исследованиями установлено, что разграничение краевых и средней зон динамической мульды вкрест простирания можно произвести по углам сдвижений:  $\varphi = 55^{\circ}$  в сухих наносах и нормальной влажности ( $\varphi = 45^{\circ}$ - в плывунах и в обводненных галечниках);  $\beta = 82^{\circ} - \alpha$ ;  $\gamma = 80^{\circ}$ , то есть, краевые зоны находятся в промежутке между зоной общего влияния и зоной опасного влияния горных работ. При этом у более чем 90% краевых точек земной поверхности оседания не превышают 15% от максимальных окончательно сформировавшейся мульды.

Согласно работе А.С. Ягунова [24] средневзвешенные по результатам инструментальных наблюдений динамические граничные углы  $\beta'_0$ ,  $\gamma'_0$  и углы полных сдвижений  $\psi'_1$ ,  $\psi'_2$ ,  $\psi'_3$  при отработке пологих и наклонных пластов с повышенными скоростями подвигания очистных забоев (до 15м/сут) в условиях Кузбасса мало отличаются от таковых, принятых в «Правилах охраны...» [13] и в определении зон общего влияния горных работ на земную поверхность их можно принимать равными:  $\varphi_0 = 45^{\circ}$  в сухих наносах и нормальной влажности ( $\varphi_0 = 30^{\circ}$ -в обводненных наносах и плывунах);  $\beta_0 = 75^{\circ} - 0.9\alpha$ ;  $\gamma_0 = 70^{\circ}$ ;  $\psi_1 = 50^{\circ} - 0.25\alpha$ ;  $\psi_2 = 50^{\circ} + 0.38\alpha$ ;  $\psi_3 = 50^{\circ}$ ;  $\theta = 90^{\circ} - 0.5\alpha$ , где  $\alpha$  – угол падения пласта.

С учетом вышеизложенного, в главном сечении вкрест простирания величины краевых зон  $L_{K3,\Pi}$ ,  $L_{K3,B}$  в полумульдах по падению и восстанию определяются из геометрии по формулам:

$$L_{K3,\Pi} = h_H (ctg \varphi_0 - ctg \varphi) + (H_{CP} - h_H + 0.5D_1 \sin \alpha) \cdot (ctg \beta_0 - ctg \beta)$$
$$L_{K3,B} = h_H (ctg \varphi_0 - ctg \varphi) + (H_{CP} - h_H - 0.5D_1 \sin \alpha) \cdot (ctg \gamma_0 - ctg \gamma)$$
(4.1)

где:  $h_H$  – мощность наносов;  $H_{CP}$  – средняя глубина разработки;  $D_1$  - ширина лавы.

Длины полумульд по падению и восстанию  $L_{\Pi}$ ,  $L_B$  при отсутствии плоского дна (при неполной подработке) (4.2) и при наличии плоского дна  $L_{\Pi \square}$ ,  $L_{B \square}$  (4.3) вычисляются по формулам:

$$L_{II} = h_{H} ctg\varphi_{0} + (H_{CP} - h_{H} + 0.5D_{1}\sin\alpha) \cdot ctg\beta_{0} + 0.5D_{1}\cos\alpha - H_{CP} ctg\theta$$
$$L_{B} = h_{H} ctg\varphi_{0} + (H_{CP} - h_{H} - 0.5D_{1}\sin\alpha) \cdot ctg\gamma_{0} + 0.5D_{1}\cos\alpha + H_{CP} ctg\theta$$
(4.2)

$$L_{\Pi \Pi} = h_H ctg \varphi_0 + (H_{CP} - h_H + 0.5D_1 \sin \alpha) \cdot ctg \beta_0 + (H_{CP} + 0.5D_1 \sin \alpha) \cdot ctg \psi_1$$
$$L_{B\Pi} = h_H ctg \varphi_0 + (H_{CP} - h_H - 0.5D_1 \sin \alpha) \cdot ctg \gamma_0 + (H_{CP} - 0.5D_1 \sin \alpha) \cdot ctg \psi_2$$
(4.3)
$$L_{\Pi HO} = L_{\Pi} + L_B - L_{\Pi \Pi} - L_{B\Pi}$$

Размеры средних зон по падению и восстанию  $L_{C3,\Pi}$ ,  $L_{C3,B}$  при отсутствии плоского дна (при неполной подработке) и при наличии плоского дна  $L_{C3,\Pi d}$ ,  $L_{C3,Bd}$  соответственно:

$$L_{C3,\Pi} = h_H \cdot ctg \varphi + (H_{CP} - h_H + 0.5D_1 \sin \alpha) \cdot ctg \beta + 0.5D_1 \cos \alpha - H_{CP} ctg \theta;$$
  

$$L_{C3,B} = h_H \cdot ctg \varphi + (H_{CP} - h_H - 0.5D_1 \sin \alpha) \cdot ctg \gamma + 0.5D_1 \cos \alpha + H_{CP} ctg \theta;$$
  

$$L_{C3,\Pi,\Pi} = h_H \cdot ctg \varphi + (H_{CP} - h_H + 0.5D_1 \sin \alpha) \cdot ctg \beta + (H_{CP} + 0.5D_1 \sin \alpha) \cdot ctg \psi_1; (4.4)$$
  

$$L_{C3,B,\Pi} = h_H \cdot ctg \varphi + (H_{CP} - h_H - 0.5D_1 \sin \alpha) \cdot ctg \gamma + (H_{CP} - 0.5D_1 \sin \alpha) \cdot ctg \psi_2$$

## 4.2. Закономерности развития оседаний точек подрабатываемой земной поверхности на профильных линиях вкрест простирания лав

По результатам инструментальных наблюдений на шахтах Кузбасса мы имеем базу данных, достаточную для установления эмпирических зависимостей между исследуемыми величинами.

Функции распределения оседаний в краевых зонах по падению  $S_{\eta, \kappa_{3, \Pi}}$  и восстанию  $S_{\eta, \kappa_{3, B}}$  представлены отношениями:

$$S_{\eta,K3,\Pi}(lt) = \frac{\eta_{\Pi,ri,lt,k}}{\eta_{\Pi,\max,ri,Lt,k}}; \ S_{\eta,K3,B}(lt) = \frac{\eta_{B,ri,lt,k}}{\eta_{B,\max,ri,Lt,k}}; lt \in [0;1]$$
(4.5)

где:  $\eta_{n,ri,lt,k}$  и  $\eta_{B,ri,lt,k}$  – текущие значения наблюдаемых оседаний в краевых зонах (КЗ) в полумульде по падению (п) и восстанию (в) отдельных точек поверхности (реперов ri) в поперечной профильной линии k-той наблюдательной станции в моменты положения очистного забоя (*lt*);  $\eta_{n,max,ri,Lt,k}$  и  $\eta_{B,max,ri,Lt,k}$  – максимальные оседания реперов (ri), достигаемые при положениях очистного





Рисунок 4.6 - К установлению функций распределения оседаний точек подрабатываемой земной поверхности в краевых зонах главного поперечного сечения динамической мульды сдвижений: *a*) в полумульде по падению; *б*) в полумульде по восстанию.

По характеру корреляционных полей делаем вывод об идентичности функций распределения оседаний в краевых частях полумульд по падению и восстанию, которые выражаются зависимостью:

$$S_{\eta,K3}(lt) = lt ; lt \in [0;1]$$
 (4.6)

В свою очередь, функции распределения оседаний в ветвях по падению  $S_{\eta,\kappa_{3,\Pi}}$  и восстанию  $S_{\eta,\kappa_{3,B}}$  средней зоны мульды вкрест простирания представлены соотношениями, аналогичными выражениям (4.5):

$$S_{\eta,C3,\Pi}(lt) = \frac{\eta_{\Pi,ri,lt,k}}{\eta_{\Pi,\max,ri,Lt,k}}; \ S_{\eta,C3,B}(lt) = \frac{\eta_{B,ri,lt,k}}{\eta_{B,\max,ri,Lt,k}}; lt \in [0;1]$$
(4.7)

где:  $\eta_{n,ri,lt,k}$  и  $\eta_{B,ri,lt,k}$  – текущие значения наблюдаемых оседаний отдельных точек поверхности (реперов ri) в ветвях по падению (п) и восстанию (в) средней зоны мульды вкрест простирания в моменты положения очистного забоя (*lt*);  $\eta_{n,max,ri,Lt,k}$  и  $\eta_{B,max,ri,Lt,k}$  – максимальные оседания реперов (ri), достигаемые при положениях очистного забоя (*Lt*)

В работе [107] в табличном виде определены функции распределения оседаний в средней зоне мульды вкрест простирания  $S_{\eta \Pi}$  и  $S_{\eta B}$  в зависимости от

относительного положения очистного забоя (*lt*) для разных значений степени подработанности земной поверхности  $N_1$ , которая, как известно, зависит от отношения ширины выемочного столба  $D_1$  к средней глубине разработки  $H_{CP}$  и может быть определена по формулам:

при 
$$\frac{D_1}{H_{CP}} \le 0,3$$
  $N_1 = 0,43$   
при  $0,3 < \frac{D_1}{H_{CP}} < 1,6$   $N_1 = 0,438 \cdot \frac{D_1}{H_{CP}} + 0,3$  (4.8)  
при  $\frac{D_1}{H_{CP}} \ge 1,6$   $N_1 = 1,0$ 

Кривые распределения оседаний от положения очистного забоя (графики функций  $S_{\eta\pi}(lt)$ ,  $S_{\eta B}(lt)$ ) в средней части мульды вкрест простирания представлены на рисунке 4.7. Вид функций зависит от значений переменной  $N_1$ .



Рисунок 4.7 - Функции распределения оседаний в средней зоне главного поперечного сечения динамической мульды сдвижений при разных степенях подработанности земной поверхности N<sub>1</sub>: *a*) в полумульде по падению; *б*) в полумульде по восстанию

Выраженные в табличном виде [107] функции *S*<sub>*η*<sup>п</sup></sub> и *S*<sub>*η*<sup>в</sup></sub> аппроксимированы обратной тригонометрической функцией вида:

$$S_{\eta n,\eta \theta}(lt) = a_0 \cdot \operatorname{arcctg}\left(a_1 \cdot lt + a_2\right) + a_3 \tag{4.9}$$

где *a*<sub>0</sub>, *a*<sub>1</sub>, *a*<sub>2</sub>, *a*<sub>3</sub> – эмпирические коэффициенты, определенные по методу наименьших квадратов, представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Коэффициенты функций распределений S<sub>ηп, ηв</sub>(*lt*) в полумульдах по падению и восстанию

$N_1$	$a_{0\pi}$	$a_{1\pi}$	$a_{2\pi}$	<i>а</i> <sub>3п</sub>	$a_{0\mathrm{B}}$	$a_{1B}$	$a_{2B}$	<i>a</i> <sub>3в</sub>
1	0,367	-10,428	3,449	-0,101	0,358	-13,227	4,523	-0,084
0,9	0,421	-6,01	1,675	-0,227	0,397	-7,41	2,231	-0,171
0,8	0,591	-3,398	0,504	-0,66	0,466	-4,727	1,148	-0,337
0,7	1,38	-2,91	-0,635	-2,956	0,64	-3,158	0,348	-0,792

При промежуточных значениях степени подработанности для поиска коэффициентов функций распределения  $S_{\eta \pi,\eta B}(lt)$  можно использовать либо линейную интерполяцию данных из таблицы 4.1, либо использовать найденные ниже эмпирические зависимости, поиск которых осуществлен через подбор аппроксимирующей функции по ее графическому виду (рис. 4.8).

Зависимость коэффициентов  $a_{0n}$ ,  $a_{2n}$  и  $a_{3n}$  представлена экспоненциальной функцией вида:

$$f_k(N_1) = b_0 + b_1 \cdot e^{b_2 N_1} \tag{4.10}$$

Зависимость остальных коэффициентов от переменной N<sub>1</sub> представлена полиномом второй степени:

$$f_k(N_1) = b_0 + b_1 \cdot N_1 + b_2 \cdot N_1^2$$
(4.11)

Эмпирические коэффициенты  $b_0, b_1, b_2$  приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Значения коэффициентов  $b_i$  для функций (4.10), (4.11)

$b_{\mathrm{i}}$	$a_{0\pi}$	$a_{1\pi}$	$a_{2\pi}$	<i>а</i> <sub>3п</sub>	$a_{0B}$	$a_{1B}$	$a_{2B}$	$a_{3\mathrm{B}}$
$b_0$	0,36	-54,053	-4,265	-0,092	3,639	-54,576	16,979	-8,824
$b_1$	-14,731	141,859	2,476	-16,068	-6,652	147,65	-49,802	17,93
$b_2$	$3,069 \cdot 10^4$	-98,25	0,647	$-2,196\cdot10^{5}$	3,375	-106,2	37,3	-9,2

Зависимости коэффициентов  $a_i$  от переменной  $N_1$  приведены на рисунке 4.8.

*а*0п  $a_{1\pi}$  $a_{2\pi}$  $a_{3\pi}$ 1.5 3 2 - 6 0.5 - 2 10 0.6 3∟ 0.6 0.6 0.7 0.8 0.9 N<sub>1</sub> 0.6 0.7 0.8 0.9 N<sub>1</sub> 0.7 0.8 0.9 N<sub>1</sub> 0.7 0.8 0.9 N<sub>1</sub>  $a_{0B}$ а<sub>1в</sub> а<sub>2в</sub> *а*<sub>Зв</sub> 0.70 0 0.6 - 0.2 3 0.5 - 0.4 2 - 10 0.4 - 0.6 0.3∟ 0.6 - 0.8 0.6 0∟ 0.6 5--0.6 0.7 0.8 0.9 N<sub>1</sub> 0.7 0.8 0.9 N<sub>1</sub> 0.7 0.8 0.9 N<sub>1</sub> 0.7 0.9 N<sub>1</sub> 0.8

Рисунок 4.8 - Вид зависимостей коэффициентов  $a_i$  функции (4.9) от переменной  $N_1$ 

На рисунке 4.9 в качестве примера приведены результаты инструментальных наблюдений по формированию профиля динамической мульды сдвижений в поперечном сечении [108].



Рисунок 4.9 - Инструментальные наблюдения оседаний подрабатываемой земной поверхности, характеризующие процесс формирования профиля динамической мульды сдвижений на разрезе вкрест простирания при прохождении очистного забоя под поперечной профильной линией: *a*) на шахте «Котинская», лава 5204 по пласту 52; *б*) на шахте «Грамотеинская», лава 631 по пласту Сычевский III (II)

Установлено, что в сечениях вкрест простирания лав сдвижения расположенных в нем точек поверхности в некоторый момент  $t_1$  начинаются при

104

положении очистного забоя  $D_{2X} \approx 0,3H_{CP}$  от проекции профильной линии и практически достигают максимального значения в момент  $t_2$  в районе  $D_{2X} \approx H_{CP}$  за проекцией профильной линии. Для главного сечения вкрест простирания эти положения совпадают с отходами очистного забоя от монтажной камеры на расстояние  $D_{2X} = 0,3H_{CP}$  и  $D_{2X} = 1,6H_{CP}$ , что соответствует нормализованному интервалу изменения [0; 1], принятому в разделе 3.

Значения величин  $\eta_{\Pi,max,ri,Lt,k}$  и  $\eta_{B,max,ri,Lt,k}$  в выражениях (4.5), (4.7) зависят от положения точек земной поверхности в полумульдах по падению и восстанию. Определим функции распределения этих максимальных оседаний  $S_{\eta,max,\Pi}(l_{H\Pi})$ ,  $S_{\eta,max,B}(l_{HB})$  в полумульдах  $L_{\Pi}$ ,  $L_{B}$  при прохождении очистным забоем расстояния Ltпод профильной линией, используя тот же методический подход, что и ранее. Корреляционные поля инструментальных наблюдений представлены на рисунке 4.10.



Рисунок 4.10 - К установлению функций распределения максимальных оседаний точек подрабатываемой земной поверхности в поперечном сечении динамической мульды сдвижений при прохождении очистным забоем расстояния *Lt* под профильной линией: *a*) в полумульде по падению; *б*) в полумульде по восстанию

Здесь функции  $S_{\eta, max, \pi}(l_{H\pi}), S_{\eta, max, B}(l_{HB})$  выражены соотношениями:

$$S_{\eta,\max,\Pi}(l_{H\Pi}) = \frac{\eta_{\Pi,\max,ri,Lt,L_{\Pi},k}}{\eta_{\max,k}}; S_{\eta,\max,B}(l_{HB}) = \frac{\eta_{B,\max,ri,Lt,L_{B},k}}{\eta_{\max,k}} \operatorname{при}$$
(4.12)
$$l_{H\Pi}, l_{HB} \in [0;1]$$

где:  $l_{H\Pi} = \frac{l_{\Pi}}{L_{\Pi}}$ ,  $l_{HB} = \frac{l_{B}}{L_{B}}$  – текущие относительные (нормализованные)

координаты расчетной точки в полумульдах по падению и восстанию. Начало отсчета  $l_{\rm H\Pi}$  принято со стороны краевой части полумульды по падению, а  $l_{\rm HB}$  – от максимального оседания поперечной динамической мульды;  $l_{\Pi}$ ,  $l_{\rm B}$  – текущие положения точек земной поверхности в полумульдах;  $\eta_{max,k}$  – наблюдаемое максимальное оседание динамической мульды сдвижения в k-той наблюдательной станции.

Приведенные на рисунке 4.10 функции распределения хорошо аппроксимируются обратными тригонометрическими функциями:

$$S_{\eta,\max,\Pi}(l_{H\Pi}) = -0,378 \cdot arcctg(8,04 \cdot l_{H\Pi} - 4,63) + 1,108$$
$$S_{\eta,\max,B}(l_{HB}) = 0,443 \cdot arcctg(4,58 \cdot l_{HB} - 1,6) - 0,144$$
(4.13)

## 4.3. Аналитические представления взаимосвязи оседаний и горизонтальных сдвижений отдельных точек на профильных линиях вкрест простирания лав

Выделим результаты парных наблюдений ( $\eta_{n,ri,t,k}$ ;  $\xi_{n,ri,t,k}$ ) в краевой зоне полумульды по падению и ( $\eta_{s,ri,t,k}$ ;  $\xi_{s,ri,t,k}$ ) по восстанию, где индексами при оседаниях  $\eta$  и горизонтальных сдвижений  $\xi$  обозначены: п, в – полумульды по падению и восстанию; ri – номер репера; t – текущий момент времени наблюдений; k – номер наблюдательной станции на конкретной шахте. Парные наблюдения также представим в относительных величинах, поделив текущие значения оседаний и горизонтальных сдвижений на максимальную величину оседаний  $\eta_{max,ri,T,k}$ , где индексом (т) обозначено общее время наблюдений, в течение которого оседание в динамической мульде сдвижений достигло максимального значения. Изображая полученные результаты в виде точек в декартовой системе координат, получим корреляционное поле (рис. 4.11). По характеру расположения точек поля можно составить предварительное представление о форме зависимости исследуемых величин.

Анализ рисунка 4.11 позволяет сделать вывод о наличии сильной линейной статистической связи между горизонтальными сдвижениями и оседаниями во времени прохождения очистного забоя под поперечной профильной линией. Зависимости имеют вид:

$$\xi_{K3,\Pi} = K_{K3,\Pi} \cdot \eta_{K3,\Pi}; \ \xi_{K3,B} = K_{K3,B} \cdot \eta_{K3,B}$$
(4.14)

где:  $\xi_{K3,\Pi}$ ,  $\xi_{K3,B}$ ,  $\eta_{K3,\Pi}$ ,  $\eta_{K3,B}$  – относительные горизонтальные сдвижения и оседания в краевых зонах (*K3*) полумульд по падению и восстанию;  $K_{K3,\Pi}$ ,  $K_{K3,B}$  - коэффициенты пропорциональности (тангенсы углов наклона линейных зависимостей).



Рисунок 4.11 - Корреляционные поля парных наблюдений оседаний и горизонтальных сдвижений на шахтах Кузбасса в краевых зонах полумульд: *a*) в полумульде по падению; *б*) в полумульде по восстанию

Тангенсы углов наклона линейных зависимостей (4.14) определены по статистическим совокупностям методом наименьших квадратов и имеют следующие численные значения:  $K_{K3,\Pi} = 0,70$ ;  $K_{K3,B} = -0,93$ . Найденные значения коэффициентов пропорциональности являются одинаковыми для всех точек подрабатываемой земной поверхности, находящихся в краевых зонах по падению и восстанию, и постоянны во времени прохождения под ними очистного забоя.

Как было отмечено выше, соотношение между горизонтальными и вертикальными сдвижениями точек поверхности в средних частях поперечного сечения можно выразить зависимостями:

$$\xi_{C3,\Pi} = K_{C3,\Pi} \cdot \eta_{C3,\Pi}; \ \xi_{C3,B} = K_{C3,B} \cdot \eta_{C3,B}$$
(4.15)

где:  $\xi_{C3,\Pi}$ ,  $\xi_{C3,B}$ ,  $\eta_{C3,\Pi}$ ,  $\eta_{C3,B}$  – относительные горизонтальные сдвижения и оседания в средних зонах (*C3*) полумульд по падению и восстанию;  $K_{C3,\Pi}$ ,  $K_{C3,B}$  - коэффициенты пропорциональности (тангенсы углов наклона линейных зависимостей).

Используя методический подход к анализу и преобразованию данных инструментальных наблюдений для установления соотношений между горизонтальными и вертикальными сдвижениями точек поверхности в краевых зонах, установим зависимость тангенсов углов наклона  $K_{C3,\Pi}$ ,  $K_{C3,B}$  от положения точек подрабатываемой земной поверхности в полумульдах  $L_{C3,\Pi}$ ,  $L_{C3,B}$  средних зон. Корреляционные поля, по которым устанавливались эти зависимости, приведены на рисунке 4.12.



Рисунок 4.12 - К установлению зависимостей коэффициентов  $K_{c3,n}$ ,  $K_{c3,B}$  выражений (4.15) от положения точек средних зон подрабатываемой земной поверхности в поперечном сечении динамической мульды сдвижений при прохождении очистным забоем расстояния *Lt* под профильной линией: *a*) в полумульде по падению, *б*) в полумульде по восстанию.
Зависимости, приведенные на рисунке 4.12, имеют вид сигмоиды и аппроксимированы эмпирическими функциями:

$$K_{C3,\Pi}(l_{H,C3,\Pi}) = 0,285 \cdot arcctg(5,606 \cdot l_{H,C3,\Pi} - 3,324) - 0,112;$$
  

$$K_{C3,B}(l_{H,C3,B}) = -0,415 \cdot arcctg(4,136 \cdot l_{H,C3,B} - 2,252) + 1,131$$
(4.16)

где  $l_{H,C3,\Pi} = \frac{l_{C3,\Pi}}{L_{C3,\Pi}};$   $l_{H,C3,B} = \frac{l_{C3,B}}{L_{C3,B}}$  текущие относительные

(нормализованные) координаты точек в полумульдах средних зон по падению и восстанию. Начало отсчета  $l_{H,C3,\Pi}$  принято со стороны краевой части полумульды по падению, а  $l_{H,C3,B}$  – от максимального оседания поперечной динамической мульды.

### 4.4. Выводы по главе

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- по особенностям развития оседаний при подвигании очистного забоя, а также по характеру соотношения между вертикальными и горизонтальными сдвижениями отдельных точек подрабатываемой земной поверхности в динамической мульде в поперечном сечении к направлению подвигания очистного забоя краевые и средние зоны в полумульдах по падению и восстанию следует рассматривать обособленно друг от друга. Размеры этих зон определяются формулами (4.1) и (4.4);

- максимальные оседания отдельных точек (реперов) поперечной профильной линии зависят от их положения в ней и могут быть определены в полумульдах по падению и восстанию зависимостями (4.13).

- функция распределения оседаний точек поверхности от подвигания в краевых частях по падению и восстанию одинакова и выражается линейной зависимостью от положения очистного забоя под данными точками (4.6). В средних зонах полумульд по падению и восстанию функции распределения оседаний определяются обратной тригонометрической функцией (4.9), в которой входящие в неё коэффициенты зависят от степени подработанности земной поверхности, оцениваемой формулой (4.8), и выражены экспоненциальной функцией (4.10) и полиномом второй степени (4.11). Найденные зависимости позволяют определить оседание произвольной точки земной поверхности на линии вкрест простирания лавы от положения очистного забоя.

- взаимосвязь между горизонтальными и вертикальными сдвижениями отдельных точек подрабатываемой поверхности в поперечном направлении к подвиганию очистного забоя имеет линейный характер на всем протяжении его движения под профильной линией. В краевой зоне по падению тангенс угла наклона линейной зависимости для всех точек зоны одинаков и равен 0,7, а в краевой зоне по восстанию – 0,93. В средних зонах по падению и восстанию коэффициенты взаимосвязи зависят от положения отдельных точек поверхности в полумульдах и определяются выражениями (4.16). Найденные коэффициенты и вычисленные ранее оседания позволяют определить горизонтальные сдвижения произвольной точки земной поверхности на линии вкрест простирания лавы от положения очистного забоя.

### 5. МЕТОДИКА ПРОГНОЗА ОЖИДАЕМЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СДВИЖЕНИЙ ОТДЕЛЬНЫХ ТОЧЕК ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОТРАБОТКЕ ПОЛОГИХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ КУЗБАССА ВЫСОКОМЕХАНИЗИРОВАННЫМИ ОДИНОЧНЫМИ ЛАВАМИ

## 5.1. Основные понятия, термины и обозначения параметров сдвижения подрабатываемой земной поверхности.

Основные понятия, термины и обозначения параметров сдвижения подрабатываемой земной поверхности приняты такими, какими они приведены в «Правилах охраны...» [13], с добавлением понятий динамических параметров процесса сдвижений.

Зона сдвижения земной поверхности – участок земной поверхности, подвергшийся сдвижению под влиянием горных выработок.

*Мульда сдвижения* – участок земной поверхности, подвергшийся сдвижению под влиянием отдельной очистной выработки.

*Динамическая мульда сдвижения* – состояния мульды сдвижения в процессе ее формирования в зависимости от положения очистного забоя лавы относительно монтажной камеры.

*Динамическая микромульда сдвижения* – состояния динамической мульды сдвижения при отходе очистного забоя лавы от монтажной камеры до образования «плоского дна».

*Оседание земной поверхности*  $\eta$  (мм; м) – вертикальная составляющая векторов сдвижения точек в зоне (мульде) сдвижения.

*Динамическое оседание земной поверхности*  $\eta_{\partial}$  (мм; м) – вертикальная составляющая векторов сдвижения точек в динамической мульде сдвижения в зависимости от положения очистного забоя лавы относительно монтажной камеры.

*Максимальное оседание*  $\eta_m$  (мм; м) – наибольшая вертикальная составляющая векторов сдвижения в момент образования «плоского дна» мульды.

*Горизонтальное сдвижение земной поверхности* ζ (мм; м) – горизонтальная составляющая векторов сдвижения точек в зоне (мульде) сдвижения.

*Динамическое горизонтальное сдвижение земной поверхности*  $\xi_{\partial}$  (мм; м) – горизонтальная составляющая векторов сдвижения точек в динамической мульде сдвижения в зависимости от положения очистного забоя лавы относительно монтажной камеры.

Полная подработка земной поверхности – подработка её очистной выработкой, при которой в динамической мульде сдвижения не происходит увеличения максимального оседания при дальнейшем увеличении размеров выработанного пространства (то есть образуется «плоское дно» мульды).

*Неполная подработка земной поверхности* – подработка, при которой с увеличением размеров выработанного пространства увеличивается максимальное оседание земной поверхности.

Коэффициент подработанности земной поверхности – отношение фактического размера выработанного пространства вкрест простирания или по простиранию пласта к минимальному размеру, при котором наступает полная подработка поверхности. Различают коэффициенты подработанности вкрест и по простиранию пласта. При полной подработке земной поверхности коэффициенты подработанности по линиям вкрест простирания ( $N_1$ ) и по простиранию ( $N_2$ ) пласта равны единице.

Главные сечения мульды сдвижения – вертикальные сечения мульды по простиранию и вкрест простирания пласта, проходящие через точки с максимальными оседаниями поверхности.

Длина полумульды – расстояние в главном сечении на разрезах вкрест простирания или по простиранию (рис. 5.1) между границей мульды и точкой пересечения с земной поверхностью линии, проведенной под углом максимального оседания (при неполной подработке) или углом полных

112

сдвижений (при полной). Различают длины полумульд вкрест простирания: *по падению*  $L_1$ , *по восстанию*  $L_2$ ; по простиранию: *полумульда позади забоя*  $L_{\Pi 3}$  – полумульда со стороны монтажной камеры, *полумульда впереди забоя*  $L_{B3}$  – соответственно со стороны демонтажной камеры.

Граничные углы  $\varphi_0$ ,  $\beta_0$ ,  $\gamma_0$ ,  $\delta_0$  – внешние относительно выработанного пространства, образованные на вертикальных разрезах по главным сечениям мульды сдвижения горизонтальными линиями и линиями, последовательно проведенными в коренных породах и наносах, соединяющими границу очистной выемки с границей зоны влияния подземных разработок на земной поверхности (рис. 5.1). По граничным углам определяются границы полной зоны влияния подземной выработки. В пределах этой зоны выделяют зону опасного влияния, границы которой определяются углами сдвижений.



Рисунок 5.1 - Параметры процесса сдвижения: *a* – вкрест простирания пласта; *б* – по простиранию пласта; *l* – угольный пласт; *2* – очистная выработка; *3* – земная поверхность; *4* – профиль мульды сдвижения; *L*<sub>1</sub> – полумульда по падению; *L*<sub>2</sub> – полумульда по восстанию; *L*<sub>3</sub> – полумульда по простиранию; *φ*<sub>0</sub>, *β*<sub>0</sub>, *γ*<sub>0</sub>, *δ*<sub>0</sub> – граничные углы; *φ*, *β*, *γ*, *δ* –углы сдвижения; *ψ*<sub>1</sub>, *ψ*<sub>2</sub>, *ψ*<sub>3</sub> – углы полных сдвижений, *θ* – угол максимального оседания; *α* – угол падения пласта.

Углы сдвижений  $\varphi$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  – внешние относительно выработанного пространства, образованные на вертикальных разрезах по главным сечениям мульды сдвижения при полной подработке горизонтальными линиями и линиями,

последовательно проведенными в коренных породах и наносах, соединяющими границу очистной выемки с границей зоны опасного влияния подземных разработок на земной поверхности (рис. 5.1).

Углы полных сдвижений - внутренние относительно выработанного пространства, образованные на вертикальных разрезах по главным сечениям мульды плоскостью пласта и линиями, соединяющими границы выработки с границами плоского дна.

Угол максимального оседания  $\theta$  – угол со стороны падения пласта, образованный на вертикальном разрезе в главном сечении мульды вкрест простирания пласта горизонтальной линией и линией, соединяющей середину очистной выработки с точкой максимального оседания земной поверхности.

Первичная подработка земной поверхности – подработка поверхности отдельной очистной выработкой в первом разрабатываемом пласте (слое).

Повторная (многократная) подработка земной поверхности – все последующие подработки выработками в первом и других пластах (слоях), оказывающие влияние на рассматриваемый участок поверхности.

#### 5.2. Исходные данные для прогноза

Исходными данными для расчёта являются:

*m* - мощность пласта, м;

α - угол падения пласта, град.;

*H*<sub>*CP*</sub> - средняя глубина разработки, м;

*D*<sub>2</sub> - длина лавы по простиранию пласта, м;

*D*<sub>1</sub> - длина лавы вкрест простирания пласта, м;

с - скорость подвигания забоя, м/сут.;

 $H_n$  - мощность повторно подрабатываемой толщи по линии  $\theta$ , м;

 $H = \frac{H_{CP}}{\sin(90^{\circ} - 0.5\alpha)}$  - мощность (глубина) всей толщи от центра выработки

до  $\eta_m$  по линии  $\theta$ , м;

 $h_{H}$  - мощность наносов, м;

Постоянными параметрами, установленными «Правилами охраны...» [13], являются:

- граничные углы для пологих и наклонных пластов, градусы:  $\beta_0 = 75^\circ - 0.9\alpha$ ,  $\gamma_0 = 70^\circ$ ,  $\delta_0 = 70^\circ$ ,  $\varphi_0 = 45^\circ$  (в обводнённых наносах и плывунах  $\varphi_0 = 30^\circ$ );

- граничный динамический угол сдвижения в коренных породах впереди забоя  $\delta'_0 = 77^0$  (установлен А.С. Ягуновым по экспериментальным данным [24]);

- углы сдвижения, градусы:  $\beta = 82^{\circ} - \alpha$ ,  $\gamma = 80^{\circ}$ ,  $\delta = 80^{\circ}$ ,  $\varphi = 55^{\circ}$  (в плывунах и обводнённых галечниках  $\varphi = 45^{\circ}$ );

- углы максимального оседания и полных сдвижений, градусы:  $\theta = 90^{\circ} - 0.5\alpha$   $\psi_1 = 50^{\circ} - 0.25\alpha$ ,  $\psi_2 = 50^{\circ} + 0.38\alpha$ ,  $\psi_3 = 50^{\circ}$ ;

- коэффициенты подработанности *N*<sub>1</sub> и *N*<sub>2</sub> определяются по формулам:

при 
$$\frac{D_1}{H_{CP}} \le 0.3$$
  $N_1 = 0.43$   
при  $0.3 < \frac{D_1}{H_{CP}} < 1.6$   $N_1 = 0.438 \cdot \frac{D_1}{H_{CP}} + 0.3$   
при  $\frac{D_1}{H_{CP}} \ge 1.6$   $N_1 = 1.0$   
(5.1)  
при  $\frac{D_2}{H_{CP}} \le 0.3$   $N_2 = 0.43$   
при  $0.3 < \frac{D_2}{H_{CP}} < 1.6$   $N_2 = 0.438 \cdot \frac{D_2}{H_{CP}} + 0.3$   
при  $\frac{D_2}{H_{CP}} \ge 1.6$   $N_2 = 1.0$ 

Нашими исследованиями установлено, что граничный угол со стороны монтажной камеры при формировании динамической мульды зависит от положения очистного забоя и определяется выражениями:

при 
$$\frac{D_{2x}}{H_{CP}} < 0,3$$
  $\delta_{0M} = 80 \cdot e^{-1,2} + 70$   
при  $0,3 \le \frac{D_{2x}}{H_{CP}} < 1,6$   $\delta_{0M} = 80 \cdot \exp(-4 \cdot \frac{D_{2x}}{H_{CP}}) + 70$  (5.2)  
при  $\frac{D_{2x}}{H_{CP}} \ge 1,6$   $\delta_{0M} = \delta_{0}$ 

Положение максимального оседания микромульды вдоль лавы определяется динамическим углом *θ*<sub>*пм*</sub> :

при 
$$\frac{D_{2x}}{H_{CP}} < 0,3$$
  $\theta_{\Pi M} = 96,5$   
при  $0,3 \le \frac{D_{2x}}{H_{CP}} < 1,6$   $\theta_{\Pi M} = -15 \cdot \frac{D_{2x}}{H_{CP}} + 101$  (5.3)  
при  $\frac{D_{2x}}{H_{CP}} \ge 1,6$   $\theta_{\Pi M} = 77$ 

### 5.3. Параметры динамической мульды и её характерные зоны

При отходе очистного забоя от монтажной камеры со скоростью (c) на поверхности будут формироваться динамические микромульды оседаний размером  $d_{3x}$  (рис. 5.2).

Положениям забоя 1, 2, 3 на поверхности соответствуют длины микромульд  $d_{3x}^{1}$ ,  $d_{3x}^{2}$ ,  $d_{3x}^{3}$ ,  $d_{3x}^{3}$  с максимальными оседаниями в точках 1', 2', 3'. Исследованиями [71, 83, 108, 111] установлено, что заметные оседания земной поверхности наблюдаются при положении забоя  $D_{2x} \ge 0,3H_{CP}$ . Величина оседаний достигает максимального значения при  $D_{2x} = 1,6H_{CP}$ . При этом образуется мульда полных оседаний длиной  $L_{30}$ , состоящей из полумульды позади забоя  $L_{II3}$  и полумульды впереди забоя  $L_{B3}$ .

Максимальное оседание (м) вычисляется по формуле (5.4):

$$\eta_m = \left[0, 7+0, 25\frac{H_{\Pi}}{H}\right] \cdot m \cdot \cos \alpha \cdot N_1 \cdot N_2$$
(5.4)

При дальнейшем движении забоя полумульда  $L_{\Pi 3}$  практически не изменяется, а полумульда  $L_{B3}$  движется со скоростью подвигания забоя, образуя «плоское дно».



Рисунок 5.2 - Схема формирования микромульд оседаний земной поверхности при отходе очистного забоя от монтажной камеры на разрезе по простиранию.

Параметры динамической мульды в главных сечениях рассчитываются по формулам:

- развивающаяся динамическая мульда по простиранию  $d_{3x}$  при различных положениях очистного забоя, оцениваемых расстоянием  $D_{2x}$  от монтажной камеры, м

$$d_{3x} = D_{2x} + (H_{CP} - h_{H}) \cdot (ctg\delta_{0}' + ctg\delta_{0}) + 2h_{H} \cdot ctg\varphi_{0}; D_{2x} \in [0, 3H_{CP}; D_{2}]$$
(5.5)

- мульда по простиранию при полной отработке лавы L<sub>3</sub>, м

$$L_3 = D_2 + (H_{CP} - h_{\mu}) \cdot (ctg\delta_0' + ctg\delta_0) + 2h_{\mu} \cdot ctg\varphi_0$$
(5.6)

- микромульда при достижении максимальных оседаний по простиранию пласта *L*<sub>30</sub>, м

$$L_{30} = 1.6H_{CP} + (H_{CP} - h_{H}) \cdot (ctg\delta_{0}' + ctg\delta_{0}) + 2h_{H} \cdot ctg\varphi_{0}$$

$$(5.7)$$

- полумульда позади забоя  $L_{\Pi 3}$ , м

при  $D_{2x} \ge 1,6 \cdot H_{CP}$   $L_{\Pi 3} = H_{CP} \cdot ctg\psi_{3M} + (H_{CP} - h_{H})ctg\delta_{0} + h_{H}ctg\phi_{0}$ 

при  $D_{2x} < 1,6 \cdot H_{CP}$   $L_{\Pi 3M} = 0,5D_{2x} + (H_{CP} - h_{\mu})ctg\delta_{0M} + h_{\mu}ctg\phi_0 - H_{CP} \cdot ctg\theta_{\Pi M}$  (5.8)

- полумульда впереди забоя  $L_{B3}$ , м

при 
$$D_{2x} \ge 1, 6 \cdot H_{CP}$$
  $L_{B3} = H_{CP} \cdot ctg \psi_{3,\mu} + (H_{CP} - h_{\mu})ctg \delta'_0 + h_{\mu}ctg \varphi_0;$ 

при  $D_{2x} < 1,6 \cdot H_{CP}$   $L_{B3M} = 0,5D_{2x} + (H_{CP} - h_{\mu})ctg\delta_0' + h_{\mu}ctg\phi_0 + H_{CP} \cdot ctg\theta_{IIM}$  (5.9)

где  $\psi_{3M} = 60,3^{\circ}$  и  $\psi_{3\chi} = 44,2^{\circ}$  - средние динамические углы полных сдвижений, определенные по данным инструментальных наблюдений;

- плоское дно по простиранию *L*<sub>П.ДНО</sub>, м

$$L_{\Pi.\mathcal{A}HO} = L_3 - L_{\Pi 3} - L_{B3} \tag{5.10}$$

Параметры мульды в поперечном сечении лавы (вкрест простирания):

- полумульды по падению  $L_{\Pi}$  и восстанию  $L_B$  до образования плоского дна D

$$(при \ \frac{D_1}{H_{CP}} \le 1,6), M$$

$$L_{II} = h_u \cdot ctg\varphi_0 + (H_{CP} + 0,5D_1 \sin \alpha - h_u) \cdot ctg\beta_0 + 0,5D_1 \cos \alpha - H_{CP} \cdot ctg\theta$$

$$L_B = h_u \cdot ctg\varphi_0 + (H_{CP} - 0,5D_1 \sin \alpha - h_u) \cdot ctg\gamma_0 + 0,5D_1 \cos \alpha + H_{CP} \cdot ctg\theta \quad (5.11)$$
- полумульды по падению  $L_{IIII}$  и восстанию  $L_{BII}$  при наличии плоского дна  
(при  $\frac{D_1}{H_{CP}} > 1,6), M$ 

$$L_{IIII} = h_u \cdot ctg\varphi_0 + (H_{CP} + 0,5D_1 \sin \alpha - h_u) \cdot ctg\beta_0 + (0,5D_1 \sin \alpha + H_{CP}) \cdot ctg(\psi_1 + \alpha)$$

$$L_{BII} = h_u \cdot ctg\varphi_0 + (H_{CP} - 0,5D_1 \sin \alpha - h_u) \cdot ctg\gamma_0 + (-0,5D_1 \sin \alpha + H_{CP}) \cdot ctg(\psi_2 - \alpha) \quad (5.12)$$

- плоское дно вкрест простирания, м

$$L_{BK, ДHO} = L_{\Pi} + L_{B} - L_{\Pi \Pi} - L_{B\Pi}$$
(5.13)

В динамической мульде ВДОЛЬ подвигания очистного забоя (по простиранию лавы) выделены четыре характерные зоны [83, 109, 113], в которых различны закономерности изменения вертикальных И горизонтальных составляющих сдвижения отдельных точек поверхности (рис. 5.3).



Рисунок 5.3 - Характерные зоны сдвижения **A**, **B**, **C** и **D** в сформированной микромульде при положении очистного забоя  $D_{2x} = 1,6H_{CP}$  на разрезе по простиранию лавы

Размеры этих зон *L*<sub>A</sub>, *L*<sub>B</sub>, *L*<sub>C</sub>, *L*<sub>D</sub> вычисляются по формулам (5.14):

$$L_{A} = H_{CP} \cdot ctg\delta_{A} + (H_{CP} - h_{\mu})ctg\delta_{0} + h_{\mu}ctg\phi_{0}$$

$$L_{B} = H_{CP} \cdot (ctg\delta_{B} - ctg\delta_{A})$$

$$L_{C} = H_{CP} \cdot (ctg\delta_{C} - ctg\delta_{D})$$

$$L_{D} = H_{CP} \cdot ctg\delta_{D} + (H_{CP} - h_{\mu})ctg\delta_{0}' + h_{\mu}ctg\phi_{0}$$
(5.14)

где  $\delta_A = 73^\circ$ ,  $\delta_B = 43^\circ$ ,  $\delta_C = 60^\circ$  и  $\delta_D = 83^\circ$  - эмпирические граничные углы характерных зон.

По характеру сдвижения точек земной поверхности в направлениях поперечного сечения лавы выделена краевая зона [105, 106, 107, 112], схема определения которой приведена на рис. 5.4.



Рисунок 5.4 - Схема определения зоны влияния отработки лавы на земную поверхность: abcd – лава; ACBD – общая зона влияния; I - краевая зона; AB – главное сечение вдоль лавы (по простиранию); CD – главное сечение в поперечном направлении (вкрест простирания);  $L_{\Pi 3}$  – полумульда позади забоя;  $L_{B3}$  – полумульда впереди забоя;  $L_{\Pi}$  – полумульда по падению;  $L_B$  – полумульда по восстанию;  $M_1$ ,  $M_1$ ,  $M_3$  – точки земной поверхности в мульде сдвижения.

В поперечном сечении величины краевых зон  $L_{K3,\Pi}$ ,  $L_{K3,B}$  в полумульдах по падению и восстанию определяются по формулам (5.15):

$$L_{K3,\Pi} = h_{\mu}(ctg\varphi_0 - ctg\varphi) + (H_{CP} - h_{\mu} + 0.5D_1\sin\alpha) \cdot (ctg\beta_0 - ctg\beta)$$
$$L_{K3,B} = h_{\mu}(ctg\varphi_0 - ctg\varphi) + (H_{CP} - h_{\mu} - 0.5D_1\sin\alpha) \cdot (ctg\gamma_0 - ctg\gamma)$$
(5.15)

Краевая зона не влияет на закономерность изменения сдвижений точек земной поверхности по направлению подвигания очистного забоя.

## 5.4. Расчет ожидаемых динамических оседаний и горизонтальных сдвижений отдельных точек земной поверхности в главном сечении по направлению подвигания очистного забоя.

5.4.1. Задание положения точки M(x,y) в мульде сдвижения производится в системе координат X0У, показанной на рис. 5.4. Начало координат расположено в центре монтажной камеры, ось 0Х направлена по центру лавы в направлении подвигания очистного забоя. От монтажной камеры в сторону подвигания забоя координата *x* положительна, в обратную сторону – отрицательна. Координата *y* в сторону восстания положительна, в сторону падения – отрицательна.

5.4.2. При  $\alpha > 0$  главное сечение по простиранию смещается в сторону падения от центральной линии лавы на величину  $\Delta y = H_{CP} ctg\theta$ . Начало мульды сдвижения отстоит от монтажной камеры на величину  $\Delta x = [(H_{CP} - h_{_H})ctg\delta_0 + h_{_H}ctg\phi_0].$ 



Рисунок 5.5 - К определению характерной зоны для заданной точки земной поверхности в главном сечении по направлению подвигания очистного забоя лавы.

5.4.3. Определение положения заданной точки M(x) в характерных зонах **A**, **B**, **C**, **D**, в полумульдах  $L_{\Pi 3}$ ,  $L_{B3}$  и плоском дне  $L_{\Pi, ДHO}$  производится с использованием формул (5.5 – 5.10), (5.14) и рис. 5.5.

Точка  $M_1(x_1)$  находится в зоне **A** при условии:  $0 \le x_1 + \Delta x \le L_A$ . При этом все точки зоны **A** находятся в полумульде  $L_{\Pi 3}$ .

Точки зоны **В** могут находиться в полумульдах  $L_{\Pi 3}$ ,  $L_{B3}$  или в плоском дне при его наличии. Для определения их положения необходимо произвести проверку следующих условий:

- точка  $M_2(x_2)$  находится в полумульде  $L_{\Pi 3}$  если:  $L_A < x_2 + \Delta x \le L_{\Pi 3}$ ;

- условие наличия плоского дна  $L_3 > L_{B3} + L_{\Pi 3}$ ;

- при отсутствии плоского дна точка  $M_2(x_2)$  находится в полумульде  $L_{B3}$  если:  $L_{\Pi 3} < x_2 + \Delta x \le L_A + L_B$ ;

- при наличии плоского дна точка M<sub>2</sub>(x<sub>2</sub>) находится в плоском дне если:

 $L_{\Pi 3} < x_2 + \Delta x \le L_{\Pi 3} + L_{\Pi. \Pi HO};$ 

- при наличии плоского дна точка  $M_2(x_2)$  находится в полумульде  $L_{B3}$  если:  $L_{\Pi 3} + L_{\Pi, ДHO} < x_2 + \Delta x \leq L_{\Pi, ДHO} + L_A + L_B.$ 

Точка  $M_3(x_3)$  находится в зоне **С** при условиях:

- при отсутствии плоского дна если:  $L_A + L_B < x_3 + \Delta x \le L_{\Pi 3} + L_{B3} - L_D$ ;

- при наличии плоского дна если:

 $L_{A} + L_{B} + L_{\Pi, \Pi, HO} < x_{3} + \Delta x \le L_{\Pi, 3} + L_{B, 3} + L_{\Pi, \Pi, HO} - L_{D}$ 

Точка  $M_4(x_4)$  находится в зоне **D** при условиях:

- при отсутствии плоского дна если:  $L_A + L_B + L_C < x_4 + \Delta x \le L_{\Pi 3} + L_{B3}$ ;

- при наличии плоского дна если:  $L_3 - L_D < x_4 + \Delta x \le L_3$ .

Точка  $M_{\kappa}(x_{\kappa})$  находится вне зоны влияния если  $0 > x_{\kappa} + \Delta x > L_3$ .

5.4.4. В зоне **A** максимальное оседание произвольной точки  $M_1(x_1)$  рассчитываем по формуле (5.16):

$$\eta_{mA} = \eta_m \cdot [0,382 \cdot arcctg \left( -8,045 \cdot \frac{x_1 + \Delta x}{L_{II3}} + 4,25 \right) - 0,089]$$
(5.16)

Динамические оседания точки в зависимости от положения очистного забоя рассчитываются по формуле (5.17):

$$\eta_{x,A}(lt) = \eta_{mA} \cdot (1 - e^{-7 \cdot lt}); lt \in [0;1]$$
(5.17)

При этом положение очистного забоя dx от монтажной камеры находится по выражению (5.18):

$$dx(lt) = (0,3+1,3\cdot lt) \cdot H_{CP}$$
(5.18)

Для представления динамических оседаний заданной точки в миллиметрах величина  $\eta_{x,A}(lt)$  умножается на -1×10<sup>3</sup>.

Зона **В** по характеру динамических оседаний точки M<sub>2</sub>(x<sub>2</sub>) делится на подзоны:

- точки в полумульде L<sub>Π3</sub>. Максимальное оседание η<sub>mBLΠ3</sub> вычисляется по формуле (5.16). Динамические оседания – по формуле (5.19):

$$\eta_{x_{2}BL_{II3}}(lt) = \eta_{mBL_{II3}} \cdot [0,362 \cdot arcctg(-13,3 \cdot lt + 3,5) - 0,1]$$

$$dx(lt) = (0,3 + 1,3 \cdot lt) \cdot H_{CP}$$
(5.19)

- точки в плоском дне при его наличии. Максимальное оседание точек равно η<sub>m</sub>. Динамическое оседание вычисляется по формуле (5.20):

$$\eta_{x_{2}B_{\mathcal{J}HO}}(lt) = \eta_{m} \cdot [0,362 \cdot arcctg(-13,3 \cdot lt + 3,5) - 0,1]$$

$$dx(lt) = x_{2} - 0,3 \cdot H_{CP} + 1,3 \cdot lt \cdot H_{CP}$$
(5.20)

- точки в полумульде L<sub>B3</sub> при отсутствии плоского дна. Максимальное оседание точки вычисляется с учетом скорости подвигания очистного забоя по формулам (5.21):

$$\eta_{mBL_{B3}}(lt) = \eta_{m} \cdot [0,392 \cdot arcctg \left(7,487 \cdot \frac{x_{2} + \Delta x - L_{\Pi 3}}{L_{B3}} - 11,35\right) - 0,118] \text{ при } V_{O3} \leq 5 \text{ м/сут}$$
$$\eta_{mBL_{B3}}(lt) = \eta_{m} \cdot [0,395 \cdot arcctg \left(7,17 \cdot \frac{x_{2} + \Delta x - L_{\Pi 3}}{L_{B3}} - 10,468\right) - 0,111]$$
$$\text{при } V_{O3} = 10 \text{ м/сут}$$
(5.21)

$$\eta_{mBL_{B3}}(lt) = \eta_m \cdot [0,43 \cdot arcctg \left(5,333 \cdot \frac{x_2 + \Delta x - L_{II3}}{L_{B3}} - 7,279\right) - 0,138]$$
 при  $V_{O3} \ge 15$  м/сут

При промежуточных значениях скоростей вычисления производятся методом интерполяции.

Динамическое оседание вычисляется по формуле (5.22):

$$\eta_{x_2BL_{B3}}(lt) = \eta_{mBL_{B3}} \cdot [0,362 \cdot arcctg(-13,3 \cdot lt + 3,5) - 0,1]$$

$$dx(lt) = x_2 - 0,3 \cdot H_{CP} + 1,3 \cdot lt \cdot H_{CP}$$
(5.22)

 точки в полумульде L<sub>B3</sub> при наличии плоского дна. В этом случае из координаты точки x<sub>2</sub> вычитается длина плоского дна и вычисления проводятся по формулам (5.21) и (5.22).

В зонах **С** и **D** произвольные точки поверхности  $M_3(x_3)$ ,  $M_4(x_4)$  находятся в полумульде  $L_{B3}$ . Максимальные оседания точек определяются по формулам (5.21) с заменой переменного нормированного сомножителя аргумента обратной тригонометрической функции. Динамические оседания вычисляются по формулам (5.23):

$$\eta_{x_{3}C}(lt) = \eta_{mC} \cdot [0,37 \cdot arcctg(-10 \cdot lt + 4,1) - 0,09]$$
  

$$\eta_{x_{4}D}(lt) = \eta_{mD} \cdot [0,03 \cdot e^{3,536 \cdot lt} - 0,03]$$
  

$$dx(lt) = x_{3,4} - 0,3 \cdot H_{CP} + 1,3 \cdot lt \cdot H_{CP}$$
  
(5.23)

5.4.5. Горизонтальные динамические сдвижения произвольной точки поверхности в главном сечении по простиранию определяются через ее динамические оседания:

- в зоне А:

$$\xi_A = \eta_m \cdot (a_0 \cdot e^{a_1 \cdot \eta_A} - a_0) \tag{5.24}$$

- в зоне В при сдвиге в сторону монтажной камеры:

$$\xi_B = \eta_m \cdot (a_0 \cdot e^{-a_1 \cdot \eta_B} - a_0) \tag{5.25}$$

- в зоне В при сдвиге в сторону демонтажной камеры:

$$\xi_B = \eta_m \cdot (a_0 \cdot e^{a_1 \cdot \eta_B} - a_2) \tag{5.26}$$

- в зонах С и D вычисления производятся по формулам (5.25) при соответствующих оседаниях η<sub>C</sub>, η<sub>D</sub> и своих эмпирических коэффициентах.

Эмпирические коэффициенты a<sub>0</sub>, a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub> функций (5.24)-(5.26) для зон A, B, C, D представлены в таблицах 5.1-5.3.

Таблица 5.1 - Эмпирические коэффициенты  $a_0$ ,  $a_1$  выражения (5.24) в отдельных интервалах  $l_{A_H}$  зоны **А** 

Интервал зоны <i>l</i> <sub>Ан</sub>	Интервал оседаний	Эмпирические коэффициенты			
		$a_0$	$a_1$		
$0 \div 0,365$	$0 \div 0,05$	0,082	14,737		
$0,365 \div 0,55$	$0 \div 0,106$	0,040	14,693		
$0,55 \div 0,70$	0 ÷ 0,19	0,034	9,773		
$0,70 \div 0,85$	$0 \div 0,348$	0,025	7,500		
$0,85 \div 0,88$	$0 \div 0,\!40$	0,031	5,660		
$0,88 \div 0,92$	$0 \div 0,\!456$	0,029	5,180		
$0,92 \div 0,95$	$0 \div 0,50$	0,028	4,400		
$0,95 \div 1,0$	$0 \div 0,\!80$	0,027	3,500		

Таблица 5.2 - Эмпирические коэффициенты  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  выражений (5.25) и (5.26) в отдельных интервалах  $l_{B_H}$  зоны **В** 

Интервал зоны І <sub>Вн</sub>	Сдвижение в сторону монтажной камеры			Сдвижение в сторону демонтажной камеры					
	Интервал	Эмпирические коэффициенты		Интервал	Эмпирические коэффициенты				
	оседании	$a_0$	a <sub>1</sub>	оседании	$\mathbf{a}_0$	$a_1$	<b>a</b> <sub>2</sub>		
В полумульде $L_{\Pi 3}$									
0÷0,04	$0 \div 0,2$	0,013	10,31	$0,2 \div 0,80$	0,001	7,9	0,016		
0,04÷0,17	$0 \div 0,3$	0,051	6,413	$0,3 \div 0,9$	0,001	6,3	0,051		
0,17÷0,3	$0 \div 0,\!4$	0,08	8,8	$0,4 \div 0,95$	0,001	5,6	0,087		
0,3÷0,45	$0 \div 0,\!45$	0,163	8,1	$0,\!45 \div 0,\!98$	0,003	4,33	0,18		
В плоском дне									
<i>L</i> <sub>П.ДНО</sub>	$0 \div 0,5$	0,202	9,35	$0,5 \div 1,0$	0,003	4,322	0,225		
В полумульде $L_{B3}$									
0,45÷0,7	$0 \div 0,\!48$	0,163	8,1	0,48 ÷ 0,725	0,003	4,15	0,182		
0,7÷1,0	$0 \div 0,45$	0,13	7,1	$0,\!45 \div 0,\!70$	0,002	4,40	0,138		

Таблица 5.3 - Эмпирические коэффициенты *a*<sub>0</sub>, *a*<sub>1</sub> выражения (5.25) и (5.26) в зонах **С** и **D** 

Зона	Сдвижение в сторону монтажной камеры			Сдвижение в сторону демонтажной камеры				
	Интервал оседаний	Эмпирические коэффициенты		Интервал	Эмпирические коэффициенты			
		$a_0$	<b>a</b> 1	оседании	$\mathbf{a}_0$	$a_1$	a <sub>2</sub>	
Зона С	$0 \div 0,45$	0,13	7,1	$0,\!45 \div 0,\!70$	0,002	4,40	0,138	
Зона D	$0 \div 0,45$	0,13	7,1	-	_	_	-	

Таким образом, расчет горизонтальных динамических сдвижений представляет собой многовариантные вычисления с условными и безусловными переходами на различные формулы и замены эмпирических коэффициентов.

# 5.5. Расчет ожидаемых динамических оседаний и горизонтальных сдвижений отдельных точек земной поверхности в главном сечении в поперечном направлении к подвиганию очистного забоя.

5.5.1. Главное сечение в поперечном направлении к подвиганию очистного забоя (вкрест простирания) показано на рис. 5.4. Произвольная точка  $M_2(x_2,y_2)$ , расположенная на линии CD может находиться в разных характерных зонах:

- в краевой зоне полумульды L<sub>B</sub> при отсутствии плоского дна, если:  $L_B > y_2 + \Delta y \ge L_B - L_{{\rm K}\!3,B}\,;$ 

- в краевой зоне полумульды  $L_{BД}$  при наличии плоского дна, если:  $L_{BД} > y_2 + \Delta y \ge L_{BQ} - L_{K3.B};$ 

- в средней зоне полумульды  $L_{\rm B}$  при отсутствии плоского дна, если:  $L_B - L_{K3,B} > y_2 + \Delta y \ge 0$ ;

- в средней зоне полумульды  $L_{\rm BJ}$  при наличии плоского дна, если:  $L_{\rm BJ} - L_{\rm K3,B} > y_2 + \Delta y \ge 0$ ;

- в средней зоне полумульды L<sub>П</sub> при отсутствии плоского дна, если:  $0>y_2-\Delta y\geq L_{_{K3,\Pi}}-L_{_{\Pi}};$ 

- в средней зоне полумульды  $L_{\Pi \square}$  при наличии плоского дна, если:  $0 > y_2 - \Delta y \ge L_{K3.\Pi} - L_{\Pi \square};$  - в краевой зоне полумульды L<sub>П</sub> при отсутствии плоского дна, если:  $L_{{\rm K}3.\Pi}-L_{\Pi}>y_2+\Delta y\geq -L_{\Pi}\,;$ 

- в краевой зоне полумульды L<sub>ПД</sub> при наличии плоского дна, если:  $L_{{\rm K}3.\Pi}-L_{\Pi\!{\rm I}\!{\rm I}}>y_2+\Delta\!y\!\ge\!-L_{\Pi\!{\rm I}\!{\rm I}}\,;$ 

- в плоском дне при его наличии, если:  $0 \ge y_2 + \Delta y > -L_{_{BK, ДHO}}$ .

5.5.2. В краевой зоне по падению максимальные оседания произвольной точки M<sub>2</sub>(*x*<sub>2</sub>,*y*<sub>2</sub>) определяются по формулам (5.27) – (5.28):

- при отсутствии плоского дна:

$$\eta_{m,K3.\Pi} = \eta_m \cdot [0,443 \cdot arcctg \left( 4,58 \cdot \frac{y_2 - \Delta y}{L_{\Pi}} - 1,6 \right) - 0,144]$$
(5.27)

- при наличии плоского дна:

$$\eta_{m,K3,\Pi,\Pi} = \eta_m \cdot [0,443 \cdot arcctg \left( 4,58 \cdot \frac{y_2 - \Delta y}{L_{\Pi,\Pi}} - 1,6 \right) - 0,144]$$
(5.28)

В средней зоне по падению максимальные оседания находящихся в ней точек поверхности при отсутствии плоского дна и при его наличии вычисляются по формулам (5.27) и (5.28) соответственно.

В средней зоне по восстанию максимальные оседания находящихся в ней точек вычисляются по формулам (5.29), (5.30):

- при отсутствии плоского дна:

$$\eta_{m,C3,B} = \eta_m \cdot \left[-0,378 \cdot arcctg\left(8,04 \cdot \frac{y_2 + \Delta y}{L_B} - 4,63\right) + 1,108\right]$$
(5.29)

- при наличии плоского дна:

$$\eta_{m,C3,BJ} = \eta_m \cdot \left[-0,378 \cdot arcctg\left(8,04 \cdot \frac{y_2 + \Delta y}{L_{BJ}} - 4,63\right) + 1,108\right]$$
(5.30)

В краевой зоне по восстанию применяются те же формулы (5.29) и (5.30) при своих длинах полумульд.

Динамические оседания точек в краевых зонах по падению и восстанию вычисляются по формулам (5.31):

$$\eta_{K3.\Pi}(lt) = \eta_{m,K3.\Pi} \cdot lt; \qquad \eta_{K3.\Pi \beta}(lt) = \eta_{m,K3.\Pi \beta} \cdot lt$$

$$\eta_{K3.B}(lt) = \eta_{m,K3.B} \cdot lt; \qquad \eta_{K3.B\beta}(lt) = \eta_{m,K3.B\beta} \cdot lt$$
(5.31)

5.5.3. Динамические оседания точек средних зон по падению и восстанию рассчитываются с учетом степени подработанности массива N<sub>1</sub>. Во всех зонах, указанных в п.5.5.2 вычисления производятся по формуле (5.32):

$$\eta_{y_2 3OHbI}\left(lt\right) = \eta_{m,3OHbI} \cdot \left[a_0 \cdot \operatorname{arcctg}\left(a_1 \cdot lt + a_2\right) + a_3\right]$$
(5.32)

где  $\eta_{y23OHbl}(lt)$  – динамические оседания произвольной точки на главном сечении с координатой у<sub>2</sub>, находящейся в соответствующей характерной зоне;

η<sub>*m*,3OHЫ</sub> – максимальное оседание точки, определяемой одной из формул (5.27) – (5.30);

*a*<sub>0</sub>, *a*<sub>1</sub>, *a*<sub>2</sub>, *a*<sub>3</sub> – эмпирические коэффициенты, которые выбираются из таблицы 5.4 для соответствующих N<sub>1</sub> с использованием методов интерполяции для промежуточных значений.

Таблица 5.4 – Коэффициенты функций распределений в полумульдах по падению и восстанию

$N_1$	$a_{0\pi}$	$a_{1\pi}$	$a_{2\pi}$	<i>а</i> <sub>3п</sub>	$a_{0\mathrm{B}}$	$a_{1B}$	<i>a</i> <sub>2в</sub>	<i>a</i> <sub>3в</sub>
1	0,367	-10,428	3,449	-0,101	0,358	-13,227	4,523	-0,084
0,9	0,421	-6,01	1,675	-0,227	0,397	-7,41	2,231	-0,171
0,8	0,591	-3,398	0,504	-0,66	0,466	-4,727	1,148	-0,337
0,7	1,38	-2,91	-0,635	-2,956	0,64	-3,158	0,348	-0,792

Для всех зон положение очистного забоя рассчитывается по формуле (5.33):

$$dx(lt) = (ctg\Psi_{3M} - 0, 3 + 1, 3 \cdot lt) \cdot H_{CP}; \ lt \in [0, 1]$$
(5.33)

5.5.4. Горизонтальные динамические сдвижения точек поверхности вкрест простирания определяется по их динамическим оседаниям:

- в краевых зонах по восстанию и падению по формулам (5.34):

$$\xi_{K3.\Pi}(lt) = 0,7 \cdot \eta_{m,K3.\Pi} \cdot lt; \qquad \xi_{K3.\Pi A}(lt) = 0,7 \cdot \eta_{m,K3.\Pi A} \cdot lt$$

$$\xi_{K3.B}(lt) = -0,93 \cdot \eta_{m,K3.B} \cdot lt; \qquad \xi_{K3.BA}(lt) = -0,93 \cdot \eta_{m,K3.BA} \cdot lt$$
(5.34)

где максимальные оседания точек в краевых частях рассчитываются по формулам (5.27) – (5.30); - в средних зонах по формулам (5.35):

$$\xi_{C3,\Pi} = K_{C3,\Pi} \cdot \eta_{C3,\Pi}; \ \xi_{C3,\Pi\mathcal{A}} = K_{C3,\Pi} \cdot \eta_{C3,\Pi\mathcal{A}}$$

$$\xi_{C3,B} = K_{C3,B} \cdot \eta_{C3,B}; \ \xi_{C3,B\mathcal{A}} = K_{C3,B} \cdot \eta_{C3,B\mathcal{A}}$$
(5.35)

где динамические оседания вычисляются по формуле (5.32); коэффициенты  $K_{C3,\Pi}$  и  $K_{C3,B}$  вычисляются по формулам (5.36) в зависимости от положения точки с нормализованной координатой  $y_{\rm H}$  в главном сечении вкрест простирания:

$$K_{C3.\Pi} = 0,285 \cdot arcctg(5,606 \cdot y_H - 3,324) - 0,112]$$

$$K_{C3.B} = -0,415 \cdot arcctg(4,136 \cdot y_H - 2,252) + 1,131]$$
(5.36)

### 5.6. Вертикальные и горизонтальные динамические сдвижения точек подрабатываемой земной поверхности в зоне влияния горных работ

5.6.1. Произвольная точка  $M_3(x_3,y_3)$  в динамической мульде сдвижения задается координатами  $x_3$  и  $y_3$  (рис. 5.4). Динамические горизонтальные сдвижения точки рассчитываются в двух направлениях: в сторону подвигания очистного забоя параллельно оси X (вдоль длины лавы) и в перпендикулярном направлении к подвиганию забоя параллельно оси Y. При построении графиков сдвижения оседания представляются отрицательной величиной.

5.6.2. Характерные зоны, в которых находится исследуемая точка поверхности  $M_3(x_3,y_3)$  определяются по величинам ее координат  $x_3$  и  $y_3$ : зоны по простиранию по условиям пункта 5.4.3, зоны вкрест простирания по условиям пункта 5.1.

5.6.3. Динамические оседания и горизонтальные сдвижения заданной точки по простиранию рассчитываются согласно пунктам 5.4.4 – 5.4.5 данной методики с умножением максимального оседания точки на величину, вычисляемую по одной из формул (5.37) для нормализованной координаты точки *у*<sub>3H</sub>:

$$S_{\eta \max \Pi}(y_{3H}) = -0.378 \cdot arcctg(8.04 \cdot y_{3H} - 4.63) + 1.108$$
$$S_{\eta \max B}(y_{3H}) = 0.443 \cdot arcctg(4.58 \cdot y_{3H} - 1.6) - 0.144$$
(5.37)

5.6.4. Динамические оседания и горизонтальные сдвижения заданной точки вкрест простирания рассчитываются согласно пунктам 5.5.2 - 5.5.4 с умножением максимального оседания точки на величину, вычисляемую по одной из формул (5.38) для нормализованной координаты точки  $x_{3H}$  при различных скоростях подвигания очистного забоя  $V_{O3}$ :

- в полумульде позади забоя  $L_{\Pi 3}$ :

$$S_{\eta \max}(x_{3H}) = 0.382 \cdot arcctg(-8.045 \cdot x_{3H} + 4.25) - 0.089$$

- в полумульде впереди забоя *L*<sub>B3</sub>:

$$S_{\eta \max}(x_{3H}) = 0,392 \cdot arcctg(7,487 \cdot x_{3H} - 11,35) - 0,118$$
 при  $V_{O3} = 5$  м/сутки  
 $S_{\eta \max}(x_{3H}) = 0,395 \cdot arcctg(7,17 \cdot x_{3H} - 10,468) - 0,111$   
при  $V_{O3} = 10$  м/сутки (5.38)

$$S_{\eta \max}(x_{3H}) = 0,42 \cdot arcctg(5,566 \cdot x_{3H} - 7,370) - 0,107$$
 при  $V_{O3} = 15$ м/сутки

5.6.5. По данному алгоритму может быть составлена программа соответствующих вычислений на любом языке программирования высокого уровня (Паскаль, Си и т.д.).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой решается научная задача прогноза сдвижений отдельных точек поверхности, расположенных в зоне влияния очистной выемки. Указанная задача имеет значение при решении научно-практических вопросов обеспечения безопасности объектов поверхности при подземной разработке угольных месторождений, в том числе при выемке с высокими скоростями подвигания забоев.

#### Основные научные результаты и выводы:

1) Характер изменения горизонтальной составляющей сдвижений отдельных точек на профильной линии по простиранию лавы позволяет выделить и охарактеризовать четыре обособленные зоны в направлении простирания, а особенности развития оседаний точек на профильной линии вкрест простирания при подвигании очистного забоя, а также характер соотношения между вертикальными и горизонтальными сдвижениями этих точек - четыре зоны в поперечном направлении. Приведены формулы, необходимые параметры и эмпирические коэффициенты для расчета геометрических размеров характерных зон.

2) По результатам выполненных исследований установлено, что максимальное оседание земной поверхности при высоких скоростях подвигания забоя с достаточной точностью определяется соответствующей формулой «Правил охраны...», при этом расхождение между фактическими максимальными оседаниями по профильным линиям на наблюдательных станциях не превышало 20% от максимальных оседаний, рассчитанных по методике «Правил...».

3) Максимальные оседания отдельных точек в сформированной динамической мульде на профильной линии по простиранию лавы зависят от положения точек и могут быть определены в полумульдах со стороны монтажной и демонтажной камер с помощью величины максимального оседания мульды сдвижения, определяемого методикой «Правил охраны...», и предложенных эмпирических зависимостей на основе обратных тригонометрических функций. 4) Установлены эмпирические формулы для расчета максимальных оседаний отдельных точек поперечных профильных линий в полумульдах по падению и восстанию, определяемых в случае расположения профильной линии в главном сечении - с помощью величины максимального оседания мульды, а в случае расположения профильной линии в сечениях, параллельных главному - с помощью максимальных оседаний точек, расположенных на пересечении профильных линий.

5) Для каждой из выделенных характерных зон определены эмпирические формулы линейного, экспоненциального и тригонометрического вида для расчета динамического оседания произвольной точки подрабатываемой поверхности в зависимости от подвигания очистного забоя.

6) Установлено, что оседания точек полумульды со стороны монтажной камеры не зависят от скорости подвигания очистного забоя. Для точек, расположенных в полумульде со стороны демонтажной камеры, увеличение скорости подвигания забоя уменьшает динамические оседания подрабатываемой поверхности. Выявленные зависимости впервые позволяют выполнить количественную оценку влияния скорости подвигания забоя на сдвижение подрабатываемой поверхности.

7) Выявлен характер соотношения вертикальных и горизонтальных сдвижений точек подрабатываемой земной поверхности в направлениях вкрест и по простиранию лавы. Для аналитического представления взаимосвязи оседаний и горизонтальных сдвижений впервые установлены эмпирические зависимости.

8) Динамическое горизонтальное сдвижение произвольной точки поверхности на профильной линии по простиранию в зависимости от положения очистного забоя может быть определено через динамическое оседание этой точки и функции взаимосвязи вертикальных и горизонтальных сдвижений.

9) Разработана «Методика прогноза ожидаемых динамических сдвижений отдельных точек земной поверхности при отработке пологих угольных пластов Кузбасса высокомеханизированными одиночными лавами».

### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород, Л., Недра, 1977, 503с.
- Gonot, Not sur les degradations survenues aux maisons situées le long du Quat Fragnee etc, Liege, 1863.
- 3. Ritter W., Die Statik der Tunnelgewölbe, Springer, Berlin, 1879.
- 4. Fayol M., Note sur les mouvements de terrain, provoqueés par l'exploitation des mines, Bull. de la Soc. de l'Industrie minerale, 1885, t.14, p.805-858.
- 5. Протодьяконов М.М. Давление горных пород на рудничную крепь, Екатеринослав, 1908.
- 6. Протодьяконов М.М. Попытка опытного исследования законов давления пород на горные выработки, «Горный журнал», 1912, кн. 4 5.
- Протодьяконов М.М. Давление горных пород и рудничное крепление, Ч.І, Гостехиздат, 1930.
- Schulz A. Untersuchungen über Dimensionen der Sichereitspfletlern für den Saarbrucken Steinkohlen bergbau. Zeit. Für das Berg-Hutten und Salinenwesen im Preussische Staate, 1867.
- Борисов А.А. Расчеты горного давления в лавах пологих пластов, М., Недра, 1964.
- 10. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов, М., Недра, 1980, 360с.
- Кратч Г. Сдвижение горных пород и защита подрабатываемых сооружений; Пер. с нем. под ред. Р.А. Муллера и И.А. Петухова. М.: Недра, 1978. 494 с.
- Орлов Г.В. Сдвижение горных пород и земной поверхности под влиянием подземной разработки: Учебное пособие для вузов. – М.: Изд-во «Горная книга», Изд-во МГГУ, 2010. – 198 с.

- Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. СПб, ВНИМИ, 1998, 290 с.
- 14. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород, земной поверхности и подрабатываемыми сооружениями на угольных и сланцевых месторождениях / Мин-во угольной промышленности СССР: Утв. 30.12.87. М.: Недра, 1989. - 96 с.
- Инструкция о порядке утверждения мер охраны зданий, сооружений и природных объектов от вредного влияния горных разработок. Утв. 26.02.86. М: Недра, 1987.
- 16. Временные правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на месторождениях руд редких металлов. Л.: ВНИМИ, 1981. – 65 с.
- Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных работ в Криворожском железорудном бассейне. Л.: ВНИМИ ,1975. – 68с.
- Правила охраны сооружений от вредного влияния подземных разработок во Львовско-Волынском угольном бассейне. - М,, 1971.
- Методические указания по определению параметров процесса сдвижения горных пород, охране сооружений и горных выработок на месторождениях цветных металлов. Л.: ВНИМИ, 1974. – 65 с.
- Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок в Донецком угольном бассейне. - М.: Минуглепрон СССР, 1972
- 21. РД 07-166-97. Инструкция по наблюдениям за сдвижениями земной поверхности и расположенными на ней объектами при строительстве в Москве подземных сооружений. Утверждена постановлением Госгортехнадзора России от 17.09.97 № 29

- 22. СНиП 2.01.09-91. Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах. М., 1992
- РД-07-113-96. Инструкция о порядке утверждения мер охраны зданий, сооружений и природных объектов от вредного влияния горных разработок. Утверждена Постановлением Госгортехнадзора России от 27 июня 2002 г. № 39
- 24. Ягунов А.С. Динамика деформаций в подрабатываемом горном массиве / Минэнерго РФ, НИИ горн. геомех. и маркшейд. дела – Межотраслевой научный центр ВНИМИ, Сибирский филиал. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2010. – 239 с.
- 25. Тетерин А.В., Посыльный Ю.В., Тетерин Е.А. Распределения сдвижений и деформаций при многократной подработке.// ГИАБ №1, 2005. С. 28-30.
- 26. Колбенков, С.П. Аналитическое выражение типовых кривых сдвижения поверхности. // Труды ВНИМИ. Л.: 1961, №43. С. 46-49.
- 27. Новоженин С.Ю. Анализ мульд сдвижения, полученных по результатам моделирования механизированной проходки эскалаторных тоннелей в Санкт–Петербурге. // Маркшейдерско–геодезическое обеспечение рационального использования, охраны недр и строительства сооружений: межвуз. сб. науч. тр. / Юж.–Рос. гос. политехн. ун–т (НПИ). Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2013.– С. 24–30.
- Сарычев В.И., Жуков С.С. К вопросу создания универсальной расчетной модели сдвижений и деформаций земной поверхности при подземной разработке пологих и наклонных угольных пластов. // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2009, вып. 3. С. 282-289.
- Посыльный Ю.В., Коваленко И.Л. Трансформирование типовых кривых оседаний земной поверхности при полной подработке в условиях Донбасса. // ГИАБ №4, 2005.

- Медянцев А. Н. Исследование сдвижения земной поверхности над горными выработками при разработке свит в Донбассе: Дисс. докт. техн. наук. – Новочеркасск, 1972. – 310 с.
- Озеров И.Ф. Разработка методов расчета деформаций земной поверхности и охраны зданий при подземной добыче антрацитов Донбасса: Дис... канд. техн. наук. – М., 1982. – 241с.
- Антощенко Н.И., Филатьев М.В., Сятковский С.С. Условия образования плоского дна мульды сдвижения земной поверхности при отработке антрацитовых пластов.// Сб. научных трудов ДонГТУ, №37, 2012. – С. 33-39.
- 33. Антощенко Н.И., Филатьев М.В., Чепурная Л.А. Определение эмпирических коэффициентов для прогнозирования динамики сдвижения земной поверхности при отработке угольных пластов. // Сборник научных трудов ДГТУ. - Алчевск:, вып.1(42), 2014. - С. 6-14.
- Авершин С.Г. Сдвижение горных пород при подземных разработках. М.: Углетехиздат, 1947. – 245 с.
- 35. Иофис М.А. Научные основы управления деформационными и дегазационными процессами при разработке полезных ископаемых. – М.: Изд. ИПКОН, 1984. – 230 с.
- Медянцев А.Н. Сдвижение горных пород и земной поверхности под влиянием горных разработок. Новочеркасск, Новочеркасский политехн. инст-т., 1976.
- Муллер Р.А. Влияние горных выработок на деформацию земной поверхности. Углетехиздат, 1958, 76 с.
- 38. Авершин С.Г. Некоторые свойства процесса сдвижения горных пород и вопросы расчета сдвижений. // Сборник трудов по вопросам исследования горного давления и сдвижения горных пород. – 1961. – Сб. 43. – С. 3-21

- Батугин С.А. Сдвижения и деформации земной поверхности и горных пород над движущимся забоем. // Сборник статей по вопросам исследования горного давления и сдвижения горных пород. – 1962. – Сб. 47. – С. 159-199
- 40. Гавриленко Ю.Н., Папазов Н.М., Морозова Т.В. Динамика оседаний земной поверхности при большой глубине разработки и высокой скорости подвигания забоя. / Проблеми гірського тиску. Донецк: ДонГТУ 2000.
   Вып. 4. С. 108-119.
- 41. Петрук Е.Г. Исследование деформаций земной поверхности в мульде сдвижения по времени. // Изв. вузов. Горный журнал. 1969. № 1. С. 40-43.
- 42. Назаренко В.А. Интерпретационная модель мульды сдвижения над движущимся очистным забоем. // Маркшейдерский вестник. 2001. №3. С. 46-49.
- Антипенко Г.А., Назаренко В.А. О терминологии в области сдвижений земной поверхности. //Симпозиум «Неделя горняка 2001». М., МГГУ, 2001. С.
- Авершин С.Г. Скорость опускания дневной поверхности под влиянием горных разработок и некоторые результаты измерений этой скорости.//Горн. журн. №10, 1937.
- 45. Авершин С.Г. Интерпретация результатов наблюдений за сдвижением пород, окружающих горную выработку.//Труды Центр. научн.-исслед. маркшейд. бюро, вып. 12, 1940.
- 46. Четверик М.С., Синенко М.А. Изменение проявления горного давления при подземной выемке угля вследствие сдвижения массива горных пород. – МГГУ, семинар №2, 2012.
- Петрук Е.Г. Управление деформационными процессами в динамической мульде сдвижения при подземной разработке пологих угольных пластов: Автореф. дис. д-ра техн. наук. – Днепропетровск, 1994. – 38 с.

- Назаренко В.А., Кучин А.С., Балафин И.Е. Закономерности изменения максимальных оседаний и наклонов земной поверхности на стадии формирования мульды сдвижения. // Наукові праці УкрНДМІ НАН України, № 5 (частина I), 2009.
- 49. Петрук Е.Г., Ларченко В.Г. Расчет горизонтальных деформаций земной поверхности при движущемся забое // Изв. вузов. Горный журнал. 1976, №7. С. 75–78.
- 50. Тенисон Л.О. Разработка методики определения деформаций земной поверхности при ее многократной подработке. Автореф. дис.- Пермь, 2012.
- Муллер Р.А. Определение мульды сдвижения и скорости деформаций земной поверхности при движущемся забое // Сдвижение горных пород. – Л.: Изд. ВНИМИ, 1975. – Сб. 96. – С. 13-27.
- 52. Медянцев А.Н., Черняев В.И. Сдвижение и деформации горных пород в подрабатываемой толще // Уголь Украины. 1961. № 11. С. 25–27.
- 53. Иофис М.А., Фастов Г.А. Характер развития деформаций в полумульде над движущимся забоем // Горное давление, сдвижение горных пород и методика маркшейдерских работ / ВНИМИ. – 1965. – Сб. 55. – С. 143-149.
- 54. Земисев В.Н. Современные проблемы сдвижения горных пород. // Уголь.
   1999.– № 10.– С. 23.
- 55. Костенич В.С., Зелепукин А.М. Результаты наблюдений за сдвижением и деформацией поверхности при большой скорости подвигания забоя и прерывной рабочей неделе // Сдвижения и деформации массива при разработке месторождений с учетом структуры и механических свойств горных пород / ВНИМИ. – 1966. – Сб. 58. – С. 137-146.
- 56. Мякенький В.И. Сдвижение и дегазация пород и угольных пластов при очистных работах. Киев: Наукова думка, 1975. 100 с.
- 57. Ковальски А. Деформация поверхности над быстро двигающимся фронтом горных работ // Proceedings IX Congress ISM, Praha 18.4-22.4. 1994. – С. 320-329.

- 58. Назимко Е.В., Канин В.А., Демченко А.И., Ефремов И.А. Прогноз динамики обрушений при отработке примыкающей к ранее выработанному пространству лавы. // Наукові праці УкрНДМІ НАН України, № 1, 2007. – С. 173 – 189.
- 59. Мустафин М.Г. Влияние скорости подвигания очистного забоя на динамику разрушения пород кровли угольного пласта. // Сб. горного информ. – аналит. бюл. – М.: Изд-во МГГУ, 2008, №1. - С. 17-22.
- Кравченко В.И. Безопасность при управлении горным давлением в лавах пологих пластов. – М.: Недра, 1975. - 221с.
- 61. Давидянц В.Т., Кравченко Г.Л. Измерения проявлений горного давления на шахтах Донецкого бассейна. М.: Углетехиздат, 1960. 208с.
- 62. Дубов Е.Д. Исследования в шахтных условиях взаимодействия механизированных крепей с боковыми породами на пологих пластах Донецкого бассейна. Автореф. дисс. канд. тех. наук. - Донецк, 1967. - 20с.
- Медведчук, Н.Д. Влияние скорости подвигания очистного на проявление горного давления при выемке угольных пластов. Автореф. дисс. канд. тех. наук. - Донецк, 1968.- 27с.
- 64. Лобков Н.И. Исследование влияния скорости подвигания на работу очистного забоя. // Материалы научно-практической конференции «Наука – жизнь – производство», Красноармейск, 2001.- С. 28-30.
- 65. Дмитриев В.А. О влиянии скорости подвигания очистного забоя на смещение кровли. // Уголь Украины, 1980, №5. С. 10–11.
- 66. Бригс Г. Оседания и обрушения поверхности под влиянием горных разработок. Перевод с английского. Л., Мир, 1948.
- 67. Briggs. Mining subsidence at Barbauchlow Mine. «Trans. Inst. Vin. Eng.», 1933, Vol. 85.
- Бахурин И.М. Сдвижение горных пород под влиянием горных разработок Л., Гостоптехиздат,1946.

- 69. Кнотте С. Влияние времени на формирование мульды сдвижения. //Вопросы расчета сдвижений поверхности под влиянием горных разработок. М., Углетехиздат, 1956.
- 70. Батугин С.А. Влияние скорости подвигания очистного забоя на сдвижения и деформации земной поверхности. //Труды по вопросам горного давления, сдвижения горных пород и методики маркшейдерских работ. - Л., Изд. ВНИМИ, 1963, том 50.
- 71. Быкадоров А.И., Ларичкин П.М., Свирко С.В. Скорость изменения горизонтальных сдвижений подрабатываемой земной поверхности высокомеханизированными забоями шахт Кузбасса. // Вестник КузГТУ, 2014. №6. С. 28-33.
- Стельмащук Е.В. Пространственно-временное моделирование мульды сдвижения при ее формировании. // Геотехнічна механіка: Межвід. зб. наук. праць. Ін-т геотехнічної механіки ім.. М.С. Полякова НАН України. Дніпропетровськ, 2007. Вип. 72. С. 25-31.
- 73. Назаренко В.А. Моделирование формирования мульды сдвижения земной поверхности над движущимся очистным забоем / В.А.Назаренко, Е.В.Стельмащук / Проблеми гірського тиску.– Вип.17. – Донецьк, ДонНТУ, 2009. – 8 с.
- 74. Назаренко В.А., Стельмащук Е.В. Хроноизолинейная модель оседания земной поверхности над очистной выработкой пологого угольного пласта. // Збірник наукових праць ДонНТУ, 2010
- 75. Назаренко В.А., Стельмащук Е.В. Анализ хроноизолинейных моделей процесса сдвижения земной поверхности в условиях западного Донбасса. // Наукові праці УкрНДМІ НАН України, № 13 (частина I), 2013
- 76. Назаренко В.А., Антипенко Г.А. О некоторых терминах и определениях процесса сдвижения земной поверхности // Уголь Украины, № 9, 2001. – С. 44–45.

- 77. Кулибаба С. Б., Рожко М. Д., Хохлов Б. В. Определение точек максимальных наклонов в мульде сдвижения // Наукові праці ДонНТУ: Серія гірничо-геологічна, 2009, вип. 9(143). – С. 158-167.
- 78. Рожко М. Д. Расчет оседаний земной поверхности с использованием точек максимальных наклонов // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничогеологічна». Вип.11(161). 2010 р. С. 18–24
- 79. Филатьев М.В. Влияние развития очистных работ на максимальное оседание земной поверхности. // Уголь Украины, 2011, № 4. С. 12 16.
- Назаренко В.А., Сдвижкова Е.А., Кучин А.С. Модель развития наклонов земной поверхности на стадии формирования мульды сдвижения для условий Западного Донбасса. // Форум гірників - 2012. - Дніпропетровськ, НГУ, 2012. – С. 242–245.
- Авершин С.Г. Обработка и использование результатов наблюдений за сдвижением поверхности. – М.: Гос. науч.техн. изд. нефтяной и горно-топл. лит., 1941. – 39 с.
- 82. Кучин О.С. Горизонтальные смещения земной поверхности над движущимся очистным забоем. Науковий вісник НГУ, 2011, № 3. С. 26-31.
- 83. Свирко С.В., Ренев А.А. Особенности смещения точек подрабатываемой земной поверхности высокоскоростными очистными забоями при отработке полого-наклонных угольных пластов Кузбасса // Вестник КузГТУ, 2015. №5. С.32-42.
- 84. Амусин Б.З., Фадеев А.Б. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики.– М.: Недра, 1975. – 144 с.
- 85. Гавриленко, Ю. Н. Комплекс программ метода конечных элементов (МКЭ) для моделирования и анализа процессов деформирования массива горных пород и земной поверхности в условиях пластовых месторождений. // Доклады III научно-технической конференции вузов Украины «Маркшейдерское обеспечение горных работ». – Донецк, 1995. – С. 31-35.

- 86. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация.: Пер. с англ. М. : Мир, 1986. 318 с.
- 87. Зенкевич О., Чанг И. Метод конечных элементов в теории сооружений и механике сплошных сред. : Пер. с англ. – М.: Недра, 1974. – 240 с.
- 88. Кашников Ю.А. [и др.]. Деформационные предвестники техногенных землетрясений при разработке месторождений углеводородов. // Физикотехнические проблемы разработки полезных ископаемых, 2011, № 4. – С. 40-49.
- Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г., Шустов Д.В. Управление процессом сдвижения горных пород при подработке борта карьера. // Маркшейдерский вестник, 2009, №6. С. 47-53.
- 90. Мустафин М.Г. Геомеханическая модель системы «выработка вмещающие породы» и ее использование при прогнозировании динамических проявлений горного давления. // Горная геомеханика и маркшейдерское дело. – СПб, ВНИМИ. – 1999.
- 91. Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987. –
  221 с.
- 92. Чеботаев, В. В. Моделирование процесса сооружения тоннелей методом конечных элементов. // Прогрессивные конструкторско-технологические решения для тоннеле- и метростроения в России. – Научные труды ОАО ЦНИИС, № 221. – М.: ОАО ЦНИИС, 2004.
- 93. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
- 94. Ашихмин С.Г. Разработка методики расчета сдвижений и деформаций подрабатываемых скальных массивов рудных месторождений методом конечных элементов. Автореф. дис. канд. техн. наук. – Екатеринбург, 1995. – 38 с.
- 95. Виттке В. Механика скальных пород. М.: Недра, 1990.

- 96. Шустов Д.В. Прогноз сдвижений и деформаций подрабатываемых скальных массивов рудных месторождений с учетом их структурнотектонических особенностей. Автореф. дис. канд. техн. наук. – Пермь, 2012. – 22 с.
- 97. Бугаёва Н.А., Назимко В.В. Особенности распределение стохастических отклонений оседаний земной поверхности при её подработке одиночной лавой. // Проблеми гірського тиску / Донец. нац. техн. ун-т. – Донецьк. – 2008. – Вип. 16. – С. 194–237.
- 98. Бугаёва Н. А., Яремчук Е.В., Назимко В.В. Определение параметров деформаций земной поверхности по стохастическим мульдам оседания. // Проблеми гірського тиску / Донец. нац. техн. ун-т. – Донецьк. – 2009. – Вип. 17. – С. 192–225.
- 99. Бугаёва Н. А., Грищенков Н.Н., Назимко И.В., Прокопенко А.И., Сотников Д.Н., Яковенко С.М., Нечипорук А.В., Назимко В.В. Установление особенностей распределения отклонений оседаний земной поверхности при выполнении натурных измерений // Проблеми гірського тиску / Донец. нац. техн. ун-т. Донецьк. 2010. Вип. 18. С. 38–56.
- 100. 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.
- 101. Новоженин С.Ю. Прогноз сдвижений и деформаций горных пород при сооружении эскалаторных тоннелей метрополитена тоннелепроходческими механизированными комплексами. Автореф. дис. канд. техн. наук. - Санкт-Петербург, 2014. - 147 с.
- 102. PLAXIS 3D. Руководство пользователя. / Plaxis bv / отпечатано ООО "НИП–Информатика"; под ред. R.B.J. Brinkgreve. 2012. 670 с.
- 103. Мустафин М.Г, Наумов А.С. Контроль допустимых деформаций земной поверхности при строительстве вертикальных выработок в условиях

застроенных территорий. - СПб. Записки Горного Института №198, 2012. -С. 194-197.

- 104. Шашкин А.Г. Вязко-упруго-пластическая модель поведения глинистого грунта. // Развитие городов и геотехническое строительство, выпуск №2/2011. – С. 1- 32.
- 105. Свирко С.В., Быкадоров А.И., Ренев А.А. Закономерности сдвижения отдельных точек подрабатываемой поверхности в условиях Кузбасса // Геомеханика в горном деле: доклады Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 2-4 декабря 2015г. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2015.
- 106. Быкадоров А.И., Ларичкин П.М., Свирко С.В., Ренев А.А. Динамика вертикальных и горизонтальных составляющих сдвижений земной поверхности вкрест простирания лав при отработке пологих и наклонных пластов Кузбасса // Вестник КузГТУ, - 2016, №1. – С. 25-33.
- 107. Свирко С.В., Быкадоров А.И., Ренев А.А., Ларичкин П.М. Несколько результатов исследований динамики сдвижения точек земной поверхности вкрест простирания лав при отработке пологих и наклонных пластов Кузбасса. // Фундаментальные и прикладные проблемы в горном деле: Материалы всероссийской научно-практической конференции. -Междуреченск, 25 февраля 2016 г. С. 162-167.
- 108. Свирко С.В., Ренев А.А. Закономерности развития оседаний земной поверхности вкрест простирания лав при отработке пологих и наклонных пластов Кузбасса с высокими скоростями подвигания забоев // Вестник КузГТУ, - 2014, №6. – С. 23-27.
- 109. Свирко С.В. О влиянии скорости подвигания очистного забоя на процессы сдвижения земной поверхности. // Вестник КузГТУ, 2016, №3 С.51-62.
- 110. Свирко С.В., Ренев А.А., Быкадоров А.И., Ларичкин П.М. Динамическая мульда сдвижений земной поверхности при разработке пологих и наклонных угольных пластов Кузбасса с повышенными скоростями
подвигания очистных забоев. // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: Материалы IV Международной науч.- практ. конф. Междуреченск, 8-10 апреля 2015 г.- Кемерово, 2015. – С.91-92.

- 111. Быкадоров А.И., Ларичкин П.М., Свирко С.В. Скорости изменения оседаний и горизонтальных сдвижений подрабатываемой земной поверхности при повышенных скоростях подвигания очистных забоев в Кузбассе // ГИАБ, - 2016, № 6. – С. 122-136.
- 112. Свирко С.В., Ренев А.А., Быкадоров А.И., Ларичкин П.М. Аналитическое представление взаимосвязи вертикальных и горизонтальных сдвижений точек подрабатываемой земной поверхности // Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: материалы VII Международной научно-практической конференции 12-13 мая 2016г. – Санкт-Петербург, 2016.
- 113. Свирко С.В., Ренев А.А. Аналитические представления взаимосвязи вертикальных и горизонтальных сдвижений точек подрабатываемой земной поверхности по простиранию // Вестник КузГТУ, - 2016, №5. – С.7-15.
- 114. Свирко С.В., Ренев А.А., Быкадоров А.И., Ларичкин П.М. Динамические сдвижения земной поверхности подрабатываемой высокоскоростными забоями шахт Кузбасса // Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: материалы VIII Международной научнопрактической конференции 15-17 мая 2017г. – Санкт-Петербург, 2017.
- 115. Alexey Renev, Sergey Svirko, Alexey Bykadorov, Valery Fedorin «The influence of advancing speed of powered mining stope with single face on earth's surface displacing in Kuzbass» // «Environment, Energy and Earth Sciences (E3S) Web of Conferences», 2017, Volume 15, 01002.