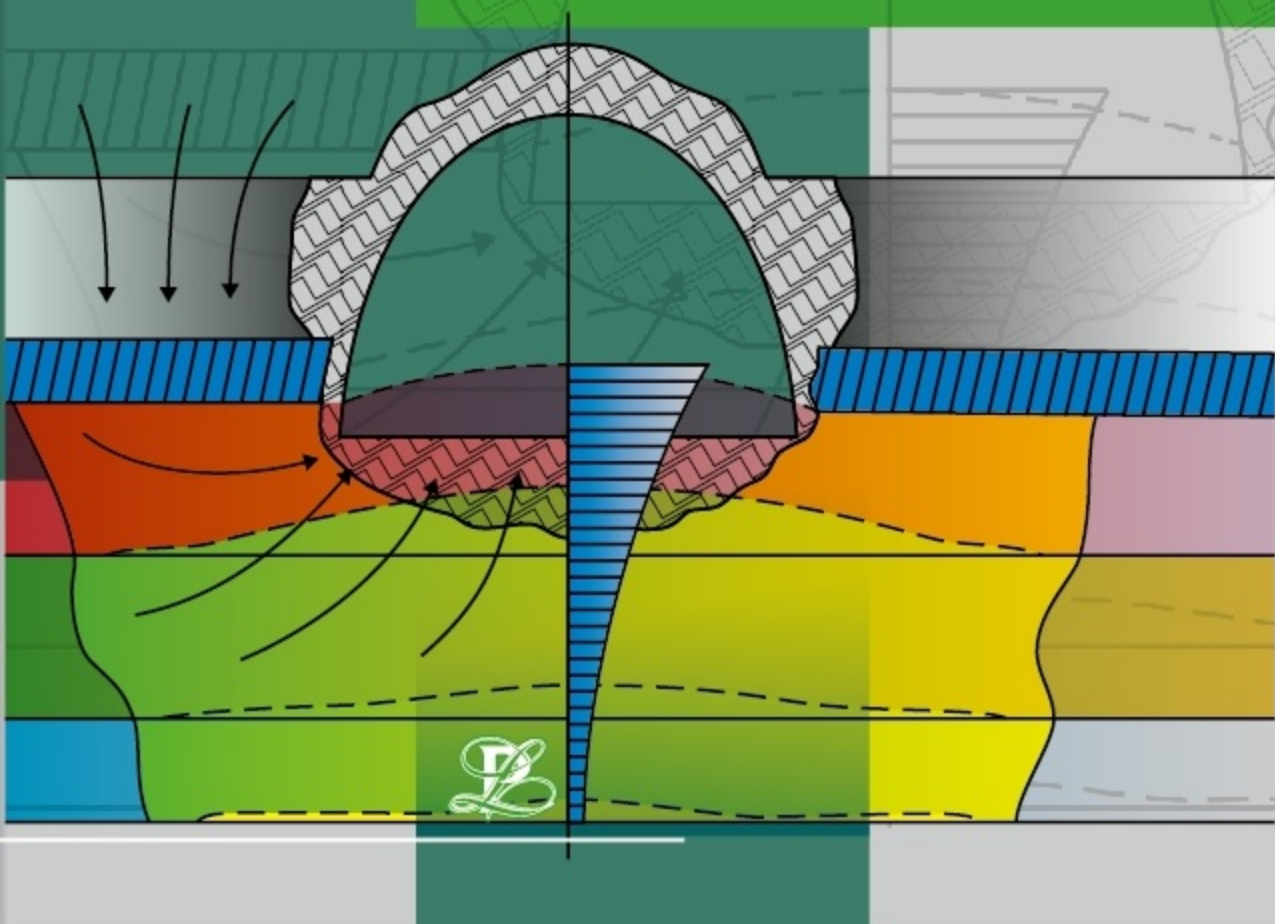


ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ

ПУЧЕНИЯ ПОРОД

В.И. Бондаренко
И.А. Ковалевская
Г.А. Симанович
В.Г. Снигур

ПОЧВЫ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ
ВЫРАБОТОК
НА ПОЛОГИХ ПЛАСТАХ
ДОНБАССА



**В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская,
Г.А. Симанович, В.Г. Снигур**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПУЧЕНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ
ВЫРАБОТОК НА ПОЛОГИХ ПЛАСТАХ ДОНБАССА**

Монография

**Днепропетровск
ТОВ «ЛізуновПрес»
2014**

УДК 622'112.4:622.28.043
ББК 33.141
Е 45

Друкується відповідно до рішення Вченої ради Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» (протокол №2 від 25.02.2014 р.)

Рецензенти: В.І. Бузило, д-р техн. наук, проф.
П.І. Пономаренко, д-р техн. наук, проф.

Бондаренко В.І., Ковалевська І.А., Симанович Г.А., Снігур В.Г. Експериментальні дослідження здимання порід підшви підготовчих виробок на пологих пластах Донбасу: монографія / В.І. Бондаренко, І.А. Ковалевська, Г.А. Симанович, В.Г. Снігур. – Дніпропетровськ: ТОВ «ЛізуновПрес», 2014. – 224 с. (російською мовою).

ISBN 978-966-2575-27-9

У монографії викладені результати багатоваріантних і багатофакторних розрахунків НДС елементів системи «масив – пластова виробка» методом скінченних елементів, розкритий механізм протікання процесів здимання порід підшви, встановлені закономірності впливу на цей процес структури й властивостей вуглевміщуючої товщі порід, розроблений метод і алгоритм проведення прогнозу здимання порід підшви пластових виробок шахт Західного Донбасу, а також наведені результати експериментальних досліджень НДС приконтурних порід і кріпильних систем низки гірничих виробок шахт Східного Донбасу.

Монографія може бути корисною для наукових співробітників проектних, науково-дослідних інститутів гірничодобувної галузі, інженерно-технічних працівників об'єднань, а також студентів гірничих Вузів і факультетів.

Друкується за авторською редакцією.

УДК 622'112.4:622.28.043
ББК 33.141

ISBN 978-966-2575-27-9

© Бондаренко В.І., Ковалевська І.А., 2014
© Симанович Г.А., Снігур В.Г., 2014
© ТОВ «ЛізуновПрес», 2014

ВВЕДЕНИЕ

Ближайшая и отдаленная перспектива энергетической независимости Украины неразрывно связана с интенсификацией технологических процессов добычи угля, в которой весьма актуальной и важной научно-технической проблемой является сохранение обширной сети подготовительных выработок (как основных, так и участковых) в надлежащем эксплуатационном состоянии. Подавляющая часть таких выработок являются пластовыми, размещенными в весьма неоднородной структуре углевмещающего массива с достаточно активными проявлениями горного давления, что отвлекает немалые ресурсы на их поддержание и существенно влияет на себестоимость добываемого угля.

Проблемы, связанные с поддержанием пластовых выработок в Донбассе, особенно актуальны в Западном Донбассе, где слабый углевмещающий массив (наряду с более крепкими угольными пластами) характеризуется интенсивным развитием такого геомеханического явления как пучение пород почвы. Более того, горные инженеры едины во мнении, что пучение пород почвы является одной из основных причин, по которой поддержание горных выработок шахт Донбасса приводит к весьма существенным объемам материальных и трудовых затрат.

Несмотря на почти вековую историю изучения этого явления и накопленный производственный опыт борьбы с пучением, единого понимания данного процесса пока не сформировано, так же как и эффективных способов и средств ограничения или полного устранения негативных последствий пучения пород почвы. При этом следует учесть значительные объемы ремонтно-восстановительных работ при низкой степени их механизации, что требует своевременного планирования мероприятий по борьбе с пучением, проявления которого разнообразны и неоднозначны в меняющейся горно-геологической ситуации поддержания пластовых выработок не только на конкретном участке шахтного поля, но и даже в пределах длины одной выработки. Поэтому, в современном активно развивающемся направлении непрерывного мониторинга технологических процессов добычи угля задача оценки состояния почвы пластовых выработок в режиме реального времени и прогнозирования пучения для обоснованного принятия технических решений является своевременной и весьма актуальной. Таким образом, обоснование и разработка метода прогноза пучения пород почвы, отражающего особенности горно-геологических условий шахт Донбасса, является важной научно-технической задачей поддержания пластовых выработок на различных глубинах в условиях интенсивной отработки тонких и весьма тонких пологих угольных пластов.

Глава 5 написана совместно с А.В. Вивчаренко, глава 9 – с В.Г. Черватюком, глава 12 – с А.В. Малыхиным.

Авторы выражают глубокую благодарность О.К. Маловой за подготовку рукописи к изданию.

1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗА ПУЧЕНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

1.1. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОДДЕРЖАНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В ПУЧАЩИХ ПОРОДАХ

Повышение конкурентоспособности угледобычи в Украине напрямую связано со снижением себестоимости конечной продукции по основным статьям затрат, среди которых весомое значение составляют издержки на поддержание горных выработок. Современный анализ производственной деятельности шахт Украины [1] указывает, что ремонтные работы в горных выработках на 60% связаны с ликвидацией последствий пучения пород почвы, где занято около 42 тыс. подземных рабочих. По иным оценкам [2 – 4] такое геомеханическое явление как пучение пород почвы является определяющим фактором в производстве ремонтно-восстановительных работ в 40 – 50% выработок, находящихся в неудовлетворительном эксплуатационном состоянии. Имеются данные [5], что в конце 80-х годов XX столетия ежегодные затраты по шахтам Донбасса на борьбу с пучением почвы составили 90 – 120 млн. руб., что эквивалентно нескольким млрд. гривен национальной валюты современной Украины; по сведениям [6] ПО «Павлоградуголь» только на подрывку почвы ежегодно затрачивалось не менее 5 млн. руб. (около 1 млрд. грн). В период до 1990 года на шахтах ДХК «Павлоградуголь» регулярно подрывали почву в выработках общей протяженностью более 130 км, на что было задолжено 10,4% штата подземных рабочих [4].

На рубеже XXI столетия в ГП «Добропольеуголь» мероприятия по подрывке пород почвы составили около 75% всего объема ремонтно-восстановительных работ [7]. С аналогичными проблемами сталкиваются горняки Воркутинского угольного месторождения [8], где ежегодный объем перекрепляемых выработок достигает 60 – 70% при основной причине – пучении пород почвы.

Ситуация не изменилась и в настоящий период времени – так, в работе [9], отмечается, что затраты на ремонтно-восстановительные работы в пучащих породах нередко сопоставимы со стоимостью проведения новых горных выработок. Обработка информации геологических и маркшейдерских служб угольных шахт Донбасса позволила сделать вывод [10,11], что вероятность пучения пород почвы подготовительных выработок составляет 70 – 80% и будет увеличиваться на перспективу с ростом глубины разработки. Аналогичные сведения указаны в работах [12 – 14]: 70% от всего объема ремонтируемых подготовительных выработок обусловлено процессами пучения пород почвы и только 30% связаны с деформированием крепежных систем.

Наиболее остро проблема пучения пород почвы стоит в Западном Донбассе, где слабый углевмещающий массив склонен к пластическому течению и уже на небольших глубинах весьма интенсивно развивается процесс пучения пород почвы. В пластовых выработках, имеющих наибольшую суммарную протяженность, пучение активизируется так называемым «эффектом штампа» [15, 16], когда более крепкий и жесткий угольный пласт под воздействием опорного давления выдавливает породы непосредственной почвы не только в бока, но и почву выработки.

Приведение почвы выработки в надлежащее эксплуатационное состояние обуславливает не только существенные материальные и трудовые затраты, – ведь, как отмечается в работе [2], уровень механизации процессов по подрывке почвы составляет 6,3%, что не сопоставимо с высокой степенью механизации проходческих работ. Здесь возникает еще одна технологическая проблема – подрывка пород почвы сопряжена с трудностями функционирования транспорта, что наряду с другими факторами сохранения эксплуатационного состояния пластовых выработок выделяет борьбу с пучением в ряд первостепенных задач.

С другой стороны, в разных горно-геологических и горнотехнических условиях интенсивность пучения пород почвы имеет существенные отличия, что требует дифференцированного подхода к мероприятиям по ограничению этого геомеханического явления. Ведь даже в пределах одного шахтного поля по отдельно взятому пласту его почва характеризуется значительным разнообразием структуры при локальном воздействии ослабляющих породу факторов (в основном, обводненности, спровоцированной как тектоникой месторождения, так и ведением горных работ), что в совокупности создает условия для существенного колебания интенсивности проявлений горного давления в почве пластовых выработок. Поэтому разнообразие структуры и свойств близлежащих породных слоев требует оценки (мониторинга) их устойчивости по всей длине пластовой выработки; соответственно, рекомендации по повышению устойчивости почвы выработки на ее отдельных участках следует разрабатывать дифференцированно в зависимости от структуры и свойств пород почвы и, обусловленной ими, интенсивности пучения.

По изложенным соображениям приобретает особую актуальность прогнозирование состояния пород почвы пластовых выработок на разных участках шахтных полей по каждому обрабатываемому пласту в пределах всего геолого-промышленного, например, района Западного Донбасса. Это позволит не только заблаговременно (еще на стадии проектирования) предусмотреть комплекс мероприятий по борьбе с пучением, но и провести их систематизацию и районирование в зависимости от степени влияния основных геомеханических факторов на процессы развития пучения пород почвы пластовых выработок.

1.2. АНАЛИЗ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О МЕХАНИЗМЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПУЧЕНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ И ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЕГО РАЗВИТИЕ

Любой прогноз проявлений горного давления базируется на определенной сумме шахтных наблюдений, лабораторных и аналитических исследований геомеханического процесса. История формирования представлений о механизме и причинах возникновения пучения пород почвы горных выработок берет начало с 20-х – 30-х годов прошлого века, когда целый ряд известных ученых [17 – 21] обратили пристальное внимание на проблему поднятия (пучения) почвы подземных сооружений различного назначения. Наряду с наблюдениями за процессом пучения и изысканием способов и средств борьбы с ним уже в то время предпринимались попытки объяснить природу этого геомеханического явления и установить факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на развитие пучения пород почвы горных выработок. Было выдвинуто несколько гипотез возникновения пучения, которые можно сгруппировать следующим образом:

- пучение обусловлено набуханием и увеличением в объеме глинистых горных пород, залегающих в почве выработок;

- пучение – следствие перехода накопившейся в приконтурном массиве потенциальной энергии исходного напряженного состояния в кинетическую энергию его перемещения в полость выработки, в том числе и со стороны почвы;

- возникновение в почве некоторого подобия распорных систем из породных слоев и блоков, которые под действием горизонтально направленных сил теряют устойчивость;

- выдавливание пород почвы как следствие действия опорного давления в боках выработка [22 – 24].

Данные представления были развиты в начале второй половины XX века. Так, в работах Городничева В.М. [25, 26] сделана попытка раскрытия механизма пучения пород почвы на основе комплекса лабораторных и шахтных исследований с последующим обобщением результатов на основе методов механики сплошной среды. Однако, недостаточное развитие (на тот момент времени) математического аппарата решения такой сложной вязкопластической задачи вынудило использовать положения теории упругости, что существенно искажало физический смысл явления. Тем не менее, автор в своей классификации причин пучения пород почвы горных выработок не ограничился только действием внутренних усилий в приконтурном массиве, но и указывал на другие группы факторов, приведенные выше. В частности, что касается фактора набухания увлажненных глинистых пород, то ряд специалистов [27 – 29] едины во мнении, что эта причина является второстепенной, а не определяющей. Компромисс степени влияния факторов предложен в работе [30], где указывается на совместное действие явления набухания пород и горного давления в провоцировании процесса пучения. Известны работы [31,

32], где на основе обширных наблюдений все же не выделен приоритетный признак или группа признаков, по которым можно было бы гарантированно прогнозировать наличие или отсутствие пучения пород почвы.

Различные представления и понимание механизма пучения сформировали (в последующий период времени) два основных направления описания данного процесса:

– разработка на основе статики сыпучей среды схем выдавливания пород боков и почвы выработки под действием вертикального горного давления или на основе строительной механики – схем устойчивости распорных систем из породных слоев и блоков в почве выработки;

– использование методов механики сплошной среды для моделирования пластического течения связных горных пород в полость выработки со стороны почвы.

К первому направлению можно отнести работы [33 – 37], где акцентируется внимание на квазихрупком разрушении и расслоении пород углевещающей толщи Донбасса, в том числе, аргиллитов и алевролитов. Поэтому целостность пород почвы нарушается, она приобретает блочную структуру и в этих условиях более применимы методы строительной механики, чем сплошной среды. Такому представлению оппонируют работы [38 – 43], где утверждается, что пучение – это реологический процесс, развивается длительное время и здесь главным фактором является ползучесть деформаций в связной сплошной среде. В качестве аргумента такого понимания явления пучения приводятся шахтные наблюдения поднятия почвы горных выработок во времени. Исследованиями, объединяющими указанные противоречащие друг другу представления, являются более ранние инженерно-геологические изыскания пучащих пород Донбасса [44, 45], где выделено три формы поведения пород почвы: пластическое течение, хрупкое разрушение и набухание водонасыщенных пород. Преобладающее влияние одной из форм зависит от типа горной породы и горно-геологических условий поддержания выработки.

Для полноты обзора представлений о направлениях описания процесса пучения пород почвы горных выработок следует выделить группу исследований [46 – 50], где использован комбинированный подход: сначала методами механики сплошной среды определяется область предельного равновесия массива в окрестности выработки, а затем, исходя из схематических представлений о потере устойчивости распорной породной системы в почве, моделируется сам процесс пучения.

Что касается факторов, провоцирующих пучение пород почвы, то один из основоположников изучения этого явления [21] еще в 20-х годах прошлого столетия выделил такие:

- перемещение контура выработки при разгрузке близлежащего массива;
- выдавливание пород боков и почвы выработки под действием опорного давления;
- увеличение объема водонасыщенных пород.

В настоящее время мнение ряда специалистов [51 – 53] по большому счету изменилось мало, принимая во внимание некоторую детализацию хрупкого разрушения пород почвы и образования в ней распорных систем. Отдельно следует отметить работы [10, 11], в которых на основе анализа и систематизации информации по 699 шахтопластам Донбасса выделено 34 горно-геологических фактора и явления. На основе корреляционно-дисперсионного анализа отобрано 11 наиболее влияющих факторов, которые рекомендуется учитывать при оценке состояния пород почвы. Такой вероятностный подход заслуживает внимания по причине обобщения разнообразных горно-геологических условий Донбасса и обширного числа факторов, что характеризует высокую степень достоверности. Поэтому считаем целесообразным учет в настоящих исследованиях ряда основных показателей, а именно: глубина разработки, сопротивление сжатию пород почвы и их мощность; такие параметры как вынимаемая мощность угольного пласта и его угол падения для условий, например, Западного Донбасса достаточно постоянны и их влияние можно оценивать по усредненным показателям.

1.3. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА ПУЧЕНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

На основе проведенного обзора существующих представлений о факторах, оказывающих весомое влияние на процесс зарождения и развития пучения пород почвы представляется необходимым провести анализ современных методов прогноза этого геомеханического явления в подземных горных выработках. Основными критериями оценки достоверности того или иного метода является адекватное отражение результатов шахтных наблюдений за проявлениями горного давления, конструктивно-технологических параметров поддержания выработки и корректное применение положений механики твердого деформируемого тела. С этих позиций рассмотрено наработанное к настоящему времени многообразие подходов, которые целесообразно объединить в несколько групп по сущности моделирования процесса пучения пород почвы горной выработки.

Первая группа методов [19, 22 – 24, 33] использует основные положения статики сыпучей среды, в частности, об образовании и сдвигении призм скольжения в полость выработки. Позитивной чертой является попытка учета экспериментально установленной взаимосвязи между опорным давлением в боках выработки и выдавливанием пород почвы. Эту взаимосвязь предполагают и доказывают многие специалисты на основе различных методов исследований, как аналитических, так и моделирования на эквивалентных материалах, а также косвенно подтверждают шахтными наблюдениями. Поэтому, по нашему мнению, предпосылки, заложенные в основу первой группы методов, являются определенным вкладом в раскрытие механизма развития процесса пучения пород почвы горных выработок. Тем не

менее, высокая степень схематичности представлений и использование методов статики сыпучей среды предопределяет ряд недостатков данной группы методов прогноза, несмотря на простоту и доступность конечных выражений по оценке состояния пород почвы.

Первая позиция – представление прилегающего к выработке массива горных пород сыпучей или квазисыпучей средой с использованием таких прочностных характеристик как угол внутреннего трения φ и сцепление c . Безусловно, приконтурный массив подвержен различной степени разупрочнения и даже разрыхления, но это касается лишь некоторых объемов горных пород, а другие области в окрестности горной выработки находятся в частично связанном или полностью целостном состоянии. То есть, реальные условия поддержания выработок характеризуются физически неоднородным поведением окружающего массива и его описание в рамках какой-либо одной модели недостаточно объективно. Более того, возникают проблемы с определением параметров c и φ на разных стадиях деформирования горной породы.

Вторая позиция – представление приконтурных пород как однородной среды не отражает реальную слоистую структуру углевмещающей толщи с существенно различными механическими свойствами как между литологическими разностями, так и по плоскостям их напластования. Поэтому для повышения достоверности прогноза приходится пользоваться набором характеристик c и φ для разных расчетных областей, что существенно усложняет задачу и первоначальное преимущество в простоте и доступности метода нивелируется. К тому же, как правило, не имеется достаточных сведений по параметрам c и φ , хотя бы по близлежащей к выработке структуре углевмещающей толщи, что затрудняет оценку состояния пород почвы.

Третья позиция – схематичность представления процессов сдвижения породных призм в полость выработки. Допущение о плоских поверхностях скольжения приконтурных породных объемов идеализированной геометрически правильной формы не соответствует действительности. Введение в расчетные схемы криволинейных поверхностей скольжения существенно усложняет вычисления, что опять-таки снижает уровень первоначальной простоты и доступности данной группы методов наряду с резким ограничением области достоверного отражения процесса. Попытки использования методов корреляционно-дисперсионного анализа результатов расчета приводят к многократному росту объемов вычислений, громоздкости конечных выражений без устранения вышеперечисленных недостатков.

По совокупности вышеизложенного первую группу методов можно рассматривать лишь в качестве первого приближения при оценке состояния пород почвы горных выработок.

Вторая группа методов построена на представлениях о формировании в почве некоторого подобия распорной породной системы по мере разупрочнения и расслоения (разной степени и глубины) первоначально целост-

ного объема пород непосредственной и основной почвы [3, 34 – 37, 39, 40, 50, 54, 55]. Перемещение пород почвы выработки провоцирует потерю контакта между ее слоями, которые деформируются относительно независимо друг от друга. При этом породный слой представлен в виде балки (или плиты), защемленной (с разной степенью жесткости) по бокам выработки. Под действием давления нижележащих слоев балка изгибается в полость выработки с появлением максимумов изгибающего момента в центральном и боковых сечениях в соответствии с классическими представлениями строительной механики [56, 57]. В этих сечениях в первую очередь происходит

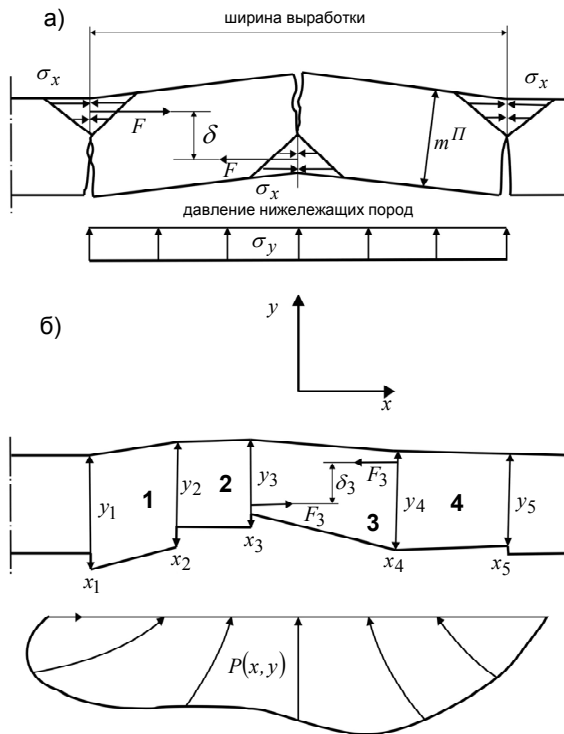


Рис. 1.1. Схемы оценки устойчивости распорной породной системы в почве выработки: а) традиционная; б) дискуссионная

развитие трещин в областях действия растягивающих горизонтальных напряжений σ_x (x – горизонтальная координата ширины выработки) и общий момент сопротивления изгибу породной балки снижается в два и более раза в зависимости от соотношения модулей деформации на растяжение и сжатие данной горной породы [58]. Остаточное сопротивление изгибающему моменту реализуется только за счет сжимающих напряжений σ_x , которые создают так называемый восстанавливающий момент $F\delta$, как показано на рис. 1.1, а (F – результирующая сила распора, δ – плечо действия силы F). Когда максимум σ_x превысит величину сопротивления сжатию $\sigma_{сж}$ породного слоя произойдет разрушение части рассматриваемых сечений (в области сжатия) и породная балка разделяется на два блока. Образуется распорная система, устойчивость которой определяется соотношением изгибающего момента от действия активных сил (давление нижележащих породных слоев) и восстанавливающего момента от действия результирующих F горизонтальных усилий, суммирующих напряжения σ_x в образовавшихся так называемых квазипластических шарнирах.

развитие трещин в областях действия растягивающих горизонтальных напряжений σ_x (x – горизонтальная координата ширины выработки) и общий момент сопротивления изгибу породной балки снижается в два и более раза в зависимости от соотношения модулей деформации на растяжение и сжатие данной горной породы [58]. Остаточное сопротивление изгибающему моменту реализуется только за счет сжимающих напряжений σ_x , которые создают так называемый восстанавливающий момент $F\delta$, как показано на рис. 1.1, а (F – результирующая сила распора, δ – плечо действия силы F). Когда максимум σ_x превысит величину сопротивления сжатию $\sigma_{сж}$

породного слоя произойдет разрушение части рассматриваемых сечений (в области сжатия) и породная балка разделяется на два блока. Образуется распорная система, устойчивость которой определяется соотношением изгибающего момента от действия активных сил (давление нижележащих породных слоев) и восстанавливающего момента от действия результирующих F горизонтальных усилий, суммирующих напряжения σ_x в образовавшихся так называемых квазипластических шарнирах.

Такие представления обладают определенными достоинствами в сравнении с предыдущими, поскольку изначально рассматривают сплошную среду (однородную или слоистую), а процесс нарушения ее целостности (с использованием такой механической характеристики как сопротивление породы сжатию $\sigma_{сж}$) в некоторой степени отражает наблюдаемые на практике явления преимущественного поднятия почвы в центральной части выработки по сравнению с боковыми. Однако, имеются и существенные недостатки, обусловленные, на наш взгляд, высокой степенью схематичности описания реального процесса пучения.

Во-первых, существует некоторая неопределенность в выборе мощности m^{II} слоя пород почвы, который может потерять устойчивость (согласно схеме на рис.1.1, а) и переместиться в полость выработки. Обычно величину m^{II} определяют по границе соседних плоскостей напластований или поверхности почвы выработки и границе разделения непосредственной и основной почвы. Здесь предполагается, что в пределах ширины выработки сцепление по поверхностям контакта рассматриваемого слоя теряется одновременно во всех точках, а сам породный слой выдержан по мощности, то есть, величина m^{II} не зависит от координаты X . Такая идеализация не вполне отвечает реальному процессу, так как, с одной стороны, нарушение контактов рассматриваемой литологической разности происходит по некоторым отдельным областям поверхности напластования, а, с другой стороны, нарушение может в первую очередь развиваться где-то внутри слоя, поскольку и алевролиты и аргиллиты обладают явно выраженной слоистой текстурой с весьма ослабленными связями на поверхностях контакта. В результате высокая вероятность частичного (в некоторых областях контакта) отделения породного слоя со ступенчатой формой границ и переменной по ширине выработки мощностью $y_i (i = 1, \dots, 5)$ как это схематично показано на рис. 1.1, б. В этой связи уместно напомнить, что момент сопротивления изгибу породного слоя находится в квадратичной зависимости от его высоты y_i , что предопределяет существенное влияние параметра y_i на устойчивость породного слоя почвы. Аналогичная степень влияния обусловлена наличием областей контактов смежных слоев, где их связь нарушена не полностью.

Во-вторых, нет уверенности в том, что распорная система по ширине выработки будет представлена только двумя породными блоками, как это показано на рис 1.1, а. Действительно, в идеализированном представлении об изгибе балки (плиты) постоянной толщины и обладающей физической однородностью [56, 57] максимум изгибающего момента появляются в центральном и боковых сечениях вне зависимости от степени жесткости защемления на ее концах. Поэтому предполагается нарушение целостности балки в указанных сечениях и образование двух породных блоков. Факторы изменения (по ширине выработки) высоты y_i балки, неравномерности нарушения контактов со смежными слоями, наличия плоскостей ослабления

(например, в виде естественной трещиноватости) и тому подобное преобразуют как эпюру изгибающего момента, так и координаты наиболее опасных сечений балки. Это обуславливает изменение не только длины породных блоков, но и их количества (см. рис. 1.1, б), что особенно важно при последующей оценке устойчивости распорной системы с соответствующим прогнозом проявлений пучения пород почвы. Общеизвестно [57], что устойчивость шарнирных балок зависит от количества этих шарниров (изменение пролета породного блока) и с их ростом снижается устойчивость распорной породной системы в почве. Таким образом, появляется неопределенность с оценкой степени устойчивости распорной системы, так как неизвестно количество слагающих ее породных блоков. Присутствует еще одна неопределенность, обусловленная степенью раскрытия трещин (контактов) между блоками в областях ранее действовавших растягивающих σ_x ; от нее зависит положение результирующей силы F_i (на рис.1.1, б приведен пример для третьего породного блока) и ее величина, что устанавливает высоту плеча δ_i действия результирующих сил F_i и напрямую влияет на величину восстанавливающего момента в распорной системе. Кроме того, при анализируемом подходе обычно не раскрывается механизм скола породных призм в районе контактов блоков на участках действия сжимающих σ_x , когда по мере их разрушения (при $\sigma_x > \sigma_{сж}$) изменяются как результирующие силы F_i , так и плечо δ_i их действия. Таким образом, по рассмотренным факторам также вызывает сомнение степень достоверности методов прогноза пучения пород почвы, построенные на гипотезе образования распорных систем.

В-третьих, весьма схематично представлены силы, возбуждающие изгиб произвольного слоя пород почвы, действующие со стороны нижележащих слоев (см. рис.1.1, а). Здесь присутствуют различные варианты от полного отсутствия усилий σ_y со стороны нижележащих породных слоев (по причине предполагаемого отрыва исследуемого слоя с полной потерей контакта) до преимущественно равномерной (по ширине выработки) эпюры вертикального горного давления. Очевидно, что ни один из указанных вариантов не соответствует реальному процессу взаимодействия породных слоев почвы горных выработок. При использовании методов строительной механики следовало бы по аналогии с работами [58 – 60] по послойному опусканию кровли создать процедуру, учитывающую силовое взаимодействие слоев при поднятии почвы, – тогда можно было бы утверждать о некоторой степени адекватности модели реальному процессу. Что касается эпюры нагружения породной балки нижележащими слоями почвы, то здесь следует отметить работы [15, 16, 61] по компьютерному моделированию процессов сдвига массива в окрестности пластовой выработки: полученная эпюра полных перемещений наглядно показывает, как косонаправленный вектор перемещений в боках выработки меняет направление до горизонтального

(координата X) в непосредственной почве под опорами стоек рамной крепи, а по мере движения к центральной части ширины выработки горизонтальные перемещения преобразуются сначала в косонаправленные (в полость выработки), а посередине выработки практически в вертикальные. Таким образом, прослеживается сложная эпюра нагружения, например, слоя непосредственной почвы, в которой имеет место не только неравномерность нагрузки (со стороны прилегающих областей почвы), но и переменный вектор этой нагрузки, как и показано на рис.1.1, б.

Подытоживая результаты анализа второй группы методов прогноза пучения почвы горных выработок следует сделать общий вывод о высокой степени идеализации реального процесса, схематичность описания которого по большинству позиций предопределяет существенную погрешность оценки состояния пород почвы.

Третья группа методов [36 – 38, 46 – 50, 62] построена на основных положениях механики твердого деформируемого тела с описанием НДС массива в окрестности горной выработки как сплошной связной среды, что позволяет отнести данную группу методов к исключительно аналитическим исследованиям с вытекающими достоинствами и недостатками, присущими им при прогнозировании проявлений горного давления. В этой связи к числу позитивных сторон следует отнести рассмотрение не локальной области приконтурных пород, а общего поля напряжений и перемещений вокруг выработки – анализируется НДС в кровле, боках и почве с соответствующей оценкой состояния этих областей и их взаимовлияния. То есть, анализируется вся картина сдвижения вмещающего выработку породного массива как связной среды, подчиняющейся условиям неразрывности перемещений и деформаций. Недостатки также обусловлены возможностями существующего математического аппарата при решении задач расчета НДС вокруг горных выработок, основные из которых сводятся к следующему.

Первый фактор – отражение структуры углевмещающей толщи в окрестностях горной выработки. Как правило, исследуется однородный горный массив с постоянными механическими характеристиками во всей расчетной области, так как реально существующую слоистость хотя бы в виде разделения на литологические разности (макрослоистость) описать используемым математическим аппаратом чрезвычайно затруднительно. Такое допущение существенно искажает поля распределения напряжений и перемещений согласно исследованиям [15, 16, 61, 63], так как прочностные и деформационные характеристики слагающих массив литотипов отличаются друг от друга до нескольких раз, а в действующих нормативных документах [64, 66] обязателен учет механических свойств на расстоянии до 20 м от центральной оси выработки. Кроме того, исследованиями [15, 63] доказано, что учет нарушения сплошности по плоскостям напластований смежных литологических разностей (расслоение) кардинально изменяет не только эпюру распределения напряжений в приконтурных породах, но и величину их перемещений в полость выработки. Таким образом, используемая в данных

методах идеализация структуры углевмещающего массива не может быть признана удовлетворительной при описании процесса пучения, так как построенные модели не достаточно адекватны реальному объекту.

Второй фактор – отражение механических свойств литологических разностей, слагающих углевмещающую толщу. В анализируемой группе методов прогноза решаются преимущественно либо упругая, либо упругопластическая задачи расчета НДС в окрестности горной выработки. Известно [67 – 70], что упругая модель поведения горной породы под нагрузкой достаточно адекватна при величинах напряжений, существенно меньших соответствующих значений предела прочности породы на сжатие, а в слабых породах линейность связи напряжений и деформаций правомерна лишь при относительно небольших нагрузках. Сами по себе упругие перемещения приконтурных пород не представляют интереса для практики ввиду своей малости по сравнению с реально наблюдаемыми в горных выработках величинами пучения пород почвы, обусловленными процессами разупрочнения и разрыхления отдельных объемов близлежащего массива. Следовательно, упругая модель поведения горной породы не отражает действительное состояние массива в интересующей нас области слабометаморфизованных пород и ее можно использовать как некую отправную точку при анализе НДС. Наступление пластического состояния обычно отражают условием постоянства элементарного объема в соответствии с классическим понятием о несжимаемой среде. Наступление предельного состояния элементарного объема устанавливается на основе той или иной теории прочности; чаще всего используют прямолинейную огибающую кругов Мора для упрощения решения. Промежуточным параметром в решении данного класса задач является размер зоны пластических деформаций, которая представляется либо окружностью, либо эллипсом в зависимости от принятого исходного напряженного состояния массива. В соответствии с классическими решениями упруго-пластических задач вокруг выработки обычно кругового очертания размер зоны неупругих деформаций $r_L(x, y)$ имеет прямо пропорциональную связь с величиной пучения пород почвы, которая, тем не менее, не достигает значений, наблюдаемых на практике. Это обуславливается рядом причин соответствия модели реальному объекту исследований; но, что касается отражения механических свойств горных пород, то одна из причин заключается в использовании деформационных характеристик целостной среды, которые не описывают полную диаграмму деформирования породы, а именно, стадии разупрочнения и разрыхления. В этом плане есть решения [69], учитывающие отмеченные стадии деформирования горной породы, однако, они непосредственно не нацелены на прогноз пучения пород почвы, а их схематичность и высокая степень идеализации процесса (однородный массив, выработка круглого очертания, отсутствие крепи и тому подобное) не позволяют рекомендовать для практического использования.

Отдельно следует отметить решения [36, 46 – 50, 62, 71, 72], где учет запредельной стадии деформирования горной породы осуществляется с по-

мощью параметра, названного «среднее значение относительного увеличения объема θ_{cp} породы в зоне неупругих деформаций», который некоторым усредненным образом описывает явление разрыхления массива. Данные решения можно назвать комбинированными, так как они объединяют классический расчет НДС упруго-пластической задачи с так называемой схемой упруго-пластической устойчивости приконтурного массива, являющейся по сути схемой предельного состояния распорной системы, образовавшейся в почве из отслоившихся объемов пород. Следовательно, объединяются и недостатки, характерные для данной и предыдущей групп методов. В плане достоверности отражения механических свойств вмещающего выработку массива вызывает сомнение целесообразность усреднения явления разупрочнения и разрыхления одним параметром θ_{cp} , ведь зона неупругих деформация имеет обширное распространение вокруг выработки (на что указывают сами анализируемые решения – величина r_L обычно составляет 2 – 3 радиуса выработки) и в каждой ее точке запредельное состояние отличается от такового в соседних точках. Образно говоря, состояние массива на внешней границе зоны неупругих деформаций принципиально отличается от его состояние на контуре выработки.

Третий фактор – отражение формы и размеров выработки, ее крепежной системы, механических свойств применяемых материалов и конструктивных особенностей элементов крепи. Как уже было отмечено выше, характерным для данной группы методов является решение плоской задачи для выработки кругового очертания по причине серьезных математических трудностей отражения ее реальной формы. Общеизвестно, что даже в однородном массиве поля распределения компонент напряжений и перемещения для реальной формы выработки и формы в виде окружности принципиально отличаются друг от друга [15, 61, 67, 68, 73, 74], а ведь именно параметры НДС массива генерируют развитие пучения пород почвы. Круглая форма выработки в совокупности с допущением об однородности массива предопределяют замкнутую и плавную форму (окружность или эллипс) зоны неупругих деформаций (с расстоянием r_L от контура выработки), в то время как более строгие решения [15, 61] указывают на существенно иные формы зоны неупругих деформаций и ее размеры, в том числе и прерывистые (локальные) по контуру выработки. На параметр r_L обращено пристальное внимание по причине его решающего влияния на величину прогнозируемого пучения пород почвы в рассматриваемой группе методов. Кроме того, эти методы не моделируют крепь и, соответственно, не рассматривают ее воздействие на процессы пучения – в основном изучается незакрепленная выработка и лишь в отдельных случаях вводится равномерная по контуру круглой выработки реакция крепи, не зависящая от процессов деформирования вмещающих пород и поэтому не отражающая реальный характер взаимодействия элементов системы «массив – крепь». Моделирование кон-

структивных особенностей крепи горных выработок вообще не рассматриваются. В этой связи следует напомнить о таком явлении как вдавливание стоек рам в слабые породы почвы. По результатам шахтных наблюдений [6, 41, 42, 75] и вычислительных экспериментов [16, 61] величина вдавливания стоек рам может достигать нескольких сотен миллиметров и существенно влиять на размеры потери сечения выработки и ее эксплуатационное состояние в целом. В аналитических методах отражение явления вдавливания стоек рамной крепи в породы почвы практически невозможно.

Из сказанного выше следует очевидный вывод о низкой адекватности описания реальных условий процесса пучения пород почвы горных выработок при прогнозировании явления с использованием третьей группы методов.

Пути повышения достоверности методов прогноза пучения пород почвы, как и других геомеханических явлений, видятся в применении многофакторного вычислительного эксперимента на базе современного программного обеспечения для расчета состояния геомеханических систем; такие исследования объединены в четвертую группу методов. Потенциальные возможности вычислительного эксперимента чрезвычайно велики, наиболее широко используемый метод конечных элементов (МКЭ) позволяет устранить большинство недостатков в ранее описанных методах прогноза:

- представление реальной структуры углевмещающего массива с моделированием нарушений контактов между литологическими разностями и других поверхностей ослабления (например, трещиноватости);

- моделирование всех стадий полной диаграммы деформирования каждой литологической разности, слагающей исследуемую геомеханическую систему;

- отражение реальной формы выработки, конструктивных особенностей ее крепежной системы с использованием механических характеристик в рамках упруго-пластического поведения крепежных материалов.

В данном направлении разработано ряд методов [7, 62, 76 – 80], которые по тем или иным факторам не реализовали в полной мере вышеприведенные преимущества МКЭ. Так, многие решения выполнены в упругой постановке, часто для выработок круглого очертания и в большинстве своем без крепи. Также не использована возможность отражения реальной геометрии рам, поперечного сечения спецпрофиля СВП, конструктивных особенностей замков податливости, опорных плит под стойками, дискретной установки рам вдоль выработки (то есть, решение пространственной задачи), параметров межрамного ограждения и тому подобное. Данные решения можно охарактеризовать как «половинчатые», поскольку не всегда обоснованные допущения и идеализации по отдельным позициям дают в сумме существенные расхождения с наблюдаемой на практике величиной пучения пород почвы, о чем иногда указывают сами авторы [79, 80].

Другой стороной исследования МКЭ является «дискретность» условий вычислительного эксперимента с определенным набором конкретных значений параметров, входящих в расчет. Для обобщения рекомендаций на

определенный круг горно-геологических и горнотехнических условий необходимо выявить комплекс закономерностей влияния каждого параметра, что обуславливает необходимость проведения широкомасштабных многофакторных вычислительных экспериментов, а затем обработки полученных результатов методами корреляционно-дисперсионного анализа. Это требует немалых затрат времени и тщательного планирования алгоритма проведения исследований, но взамен повышается степень объективности геомеханической модели и достоверности последующих прогнозов пучения пород почвы горных выработок. Указанное направление решения геомеханических задач представляется наиболее перспективным, учитывая необходимость отражения и обобщения особенностей пучения пород почвы горных выработок шахт, например, Западного Донбасса, где характеристики углевмещающей толщи существенно отличаются от других регионов Донбасса. Метод обобщения результатов многофакторных вычислительных экспериментов целесообразно использовать в комплексе с постоянным сравнительным анализом данных существующих экспериментальных исследований проявлений пучения пород почвы [4, 6, 9, 37, 41 – 43, 75], аналитико-экспериментальных и статистических методов [10, 11, 34, 81], а также рекомендаций руководящих нормативных документов [64 – 66].

1.4. СТРУКТУРА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ГЕОЛОГО-ПРОМЫШЛЕННОМУ РЕГИОНУ «ЗАПАДНЫЙ ДОНБАСС»

Успешная реализация выбранного направления разработки метода прогноза пучения пород почвы горных выработок базируется на обосновании стратегии выполнения исследований, которая более наглядно представлена структурно-логической схемой на рис. 1.2. Она состоит из отдельных блоков и задач, взаимосвязь которых подчинена единой цели – создание базы для планирования научно обоснованных технических решений шахт Западного Донбасса путем мониторинга состояния пород почвы на основе разработки метода прогноза процессов развития ее пучения.

Первая группа задач, объединенная в блок I, нацелена на обоснование и разработку такой геомеханической модели процесса пучения пород почвы, которая бы наиболее полно отражала особенности явления, характерные для условий поддержаний пластовых выработок на шахтах Западного Донбасса, при максимально адекватном моделировании основных конструктивных элементов крепи системы. Такая постановка потребовала весьма взвешено подойти к выбору стратегии исследований с использованием комплекса методов:

– базовым методом является многовариантный вычислительный эксперимент с использованием современного программного обеспечения МКЭ;

- многовариантность и многофакторность расчетов обосновывается детальным анализом и систематизацией особенностей строения и свойств углевмещающей толщи в окрестности пластовых выработок, а также необходимостью достоверного отражения элементов конструкции крепежной системы;
- степень достоверности результатов тестируется путем сравнительного анализа с данными существующих шахтных исследований пучения пород почвы выработок на шахтах Западного Донбасса;
- результаты многовариантных расчетов служат исходной базой данных для построения уравнений регрессии, описывающих закономерности развития процесса пучения.

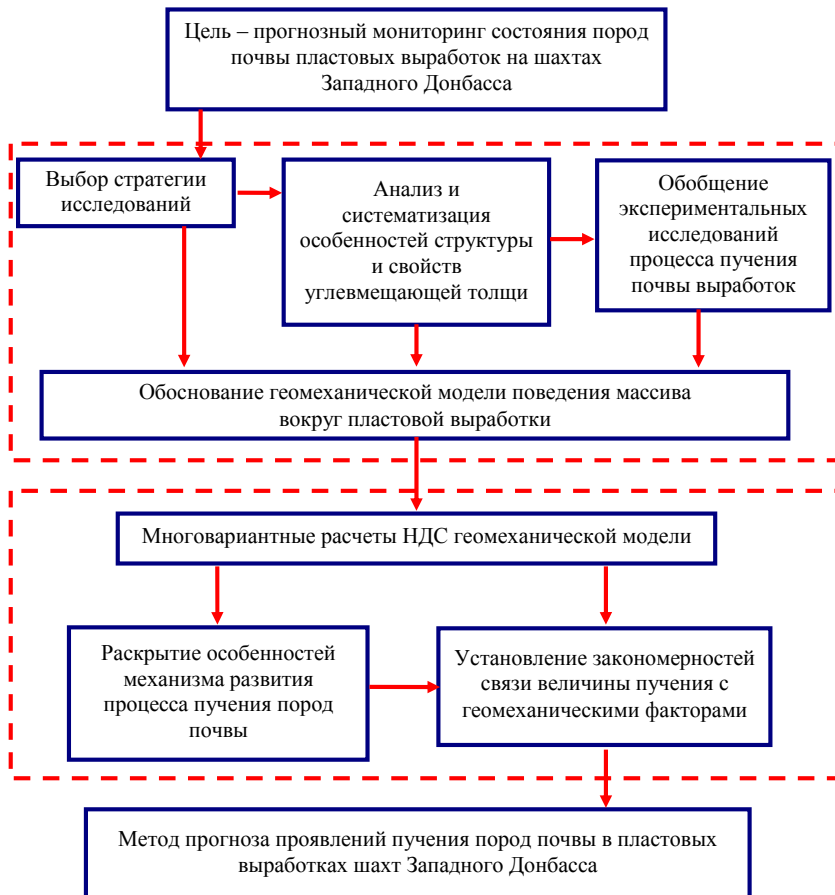


Рис. 1.2. Структурно-логическая схема реализации цели исследований на шахтах Западного Донбасса

Конечным результатом исследований блока I является всестороннее обоснование геомеханической модели поведения слоистого массива слабых пород вокруг пластовой выработки.

Блок II включает круг задач по созданию базы данных для разработки метода прогноза пучения пород почвы пластовых выработок на шахтах Западного Донбасса:

- составление комплекса вариантов значений исходных параметров модели для всестороннего отражения геомеханических условий поддержания пластовых выработок;

- проведение многовариантных расчетов НДС массива (по результатам вычислительных экспериментов) и раскрытие механизма протекания процесса пучения в зависимости от структуры и свойств углевмещающей толщи;

- установление закономерностей связи величины пучения пород почвы с геомеханическими параметрами поддержания выработки и их разделение по характеру развития процесса.

Последняя из задач блока II является итоговым результатом исследований и напрямую связана с конечной целью – разработка метода прогноза пучения пород почвы пластовых выработок на шахтах Западного Донбасса (см. рис. 1.2), который оформляется в виде самостоятельного документа, позволяющего заблаговременно производить оценку состояния пород почвы на всем протяжении выработки при меняющейся горно-геологической ситуации. Кроме того, достигнутая общность решений и рекомендаций позволяет производить мониторинг проявлений пучения пород почвы в широком спектре горно-геологических условий шахт Западного Донбасса, что способствует своевременному планированию и реализации научно обоснованных мероприятий по нейтрализации негативных последствий данного геомеханического явления.

2. ПОСТРОЕНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ «МАССИВ – ПЛАСТОВАЯ ВЫРАБОТКА»

2.1. СТРУКТУРА БЛИЗЛЕЖАЩЕЙ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕЙ ПОРОДНОЙ ТОЛЩИ ОТРАБАТЫВАЕМЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ЗАПАДНОГО ДОНБАССА

2.1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Обоснованное и адекватное реальным условиям моделирование строения и свойств углеводородного массива в окрестности горной выработки является основой получения достоверных результатов по оценке состояния системы «массив – пластовая выработка».

По данным широкомасштабных геологических изысканий прошлого столетия угленосные отложения Донбасса представлены в основном терригенными породами – песчаником, алевролитом и аргиллитом, среди которых в виде маломощных слоев заключены пласты углей и слои известняков. Терригенные породы в угленосной толще составляют 90 – 95%, причем в некоторых свитах резко преобладают аргиллиты и алевролиты – до 80%. Карбонатные породы представлены в основном известняками, которые среди угленосных отложений Донбасса играют подчиненную роль, составляя в разрезах отдельных свит 0,2 – 5%. Угли и углисто-глинистые породы составляют обычно 0,5 – 2% от общей мощности свиты. Из приведенных данных следует достаточная объективность моделирования углеводородной толщи, состоящей из угольных пластов и породных слоев аргиллитов, алевролитов и песчаников.

Угленосные отложения Западного Донбасса соответствуют общим закономерностям, но при отражении строения углеводородного массива модели в первую очередь встает вопрос о размерах (по высоте) моделируемой стратиграфической колонки. Иными словами, на какую высоту в кровлю и какую глубину в почву угольного пласта, а главное – какую структуру углеводородной породной толщи целесообразно моделировать? Здесь также следует обратиться к обширным и продолжительным (как минимум, полувековым) исследованиям прошлого столетия, которые однозначно утверждают, что вне зоны влияния очистных работ устойчивость пластовой выработки определяется состоянием близлежащих пород кровли и почвы: аналитико-экспериментальные исследования показывают, что возмущения НДС распространяются на высоту (глубину) до 10 – 15 м; в отраслевых руководящих нормативных документах эта область ограничивается от полутора ширин выработки в проходке до 20 м от ее центральной части, что хорошо коррелирует с аналитико-экспериментальными исследованиями. Окончательно решение о рациональных размерах модели углеводородного массива будут приняты по результатам предстоящих тестовых расчетов, а на этапе ее построения приняты (в качестве первого приближения) максимальные размеры (по 15 м в кровле и почве и по 10 м с каждой стороны в боках) и

для них проведен анализ структуры близлежащего углевмещающего массива угольных пластов Западного Донбасса, наиболее характерные параметры которого отражены в компьютерной модели.

Ряд исследователей [37, 82, 83] сходятся во мнении, что на развитие пучения почвы выработки влияют не только механические свойства пород, но и строение (соотношение мощностей) близлежащих породных слоев почвы. Кроме того, многие специалисты считают, что интенсивность пучения также зависит от мощности и свойств пород непосредственной кровли и ближних слоев основной кровли пластовой выработки; некоторые закономерности этой связи для Западного Донбасса представлены в работе [84]. Таким образом, необходимо проанализировать информацию о наиболее достоверных вариантах строения пород кровли и почвы на глубину максимум до 15 м (детально до 10 м). Такие исследования для Западного Донбасса были проведены на базе обработки информации по 553 геологоразведочным скважинам Павлоградско-Петропавловского района и подробно изложены в работе [83]. Наша задача – на базе данных [83] разработать варианты наиболее характерных структур близлежащих к угольным пластам породных слоев кровли и почвы, которые будут приняты к моделированию НДС системы «массив – пластовая выработка».

2.1.2. ЛИТОТИП И МОЩНОСТЬ БЛИЗЛЕЖАЩИХ ПОРОДНЫХ СЛОЕВ КРОВЛИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Литологический состав пород непосредственной и близлежащей основной кровли разрабатываемых угольных пластов Западного Донбасса не отличается большим разнообразием и согласно исследованиям [83] представлен следующими разностями:

– непосредственная кровля: аргиллит – 52%, алевролит – 36%, песчаник – 12%;

– основная кровля: алевролит – 45%, аргиллит – 33%, песчаник – 22%.

Вероятность появления той или иной литологической разности в основной кровле угольного пласта не является стабильной и зависит некоторым образом от литотипа пород непосредственной кровли, что будет рассмотрено при моделировании свойств пород кровли пластовой выработки.

Для анализа мощностей m_i^k породных слоев непосредственной и основной кровли предложена [83] разбивка на следующие интервалы:

– непосредственная кровля: менее 1 м, 1 – 2 м и 2 – 4 м;

– основная кровля: менее 4 м, 4 – 8 м и более 8 м.

Таким образом, суммарная мощность исследуемых слоев кровли вполне отражает возможную высоту возмущений НДС в кровле, вызванных проведением выработки. Распределение вероятности строения пород непосредственной и близлежащей основной кровли следующее:

– непосредственная кровля: менее 1 м – 25%, 1 – 2 м – 31%, 2 – 4 м – 44%;

– основная кровля: менее 4 м – 26%, 4 – 8 м – 41%, более 8 м – 33%.

Кроме того, установлен [83] гармонический закон изменения мощностей породных слоев кровли с удалением от угольного пласта, который характеризуется периодом, кратным двум слоям. Это означает повышенную вероятность таких сочетаний:

– пониженная мощность первого и третьего слоев при повышенной мощности второго и четвертого;

– повышенная мощность первого и третьего слоев при пониженной мощности второго и четвертого. Но, с увеличением расстояния от угольного пласта гармонический закон колебания мощности соседних слоев затухает.

На основании имеющегося натурального материала построены варианты (табл. 2.1) строения близлежащих пород кровли, которые одновременно удовлетворяют гармоническому характеру изменения мощностей слоев по высоте кровли и вероятности распределения мощности в пределах одного слоя. Кроме того, набор вариантов должен обеспечить достаточную надежность последующего корреляционно-дисперсионного анализа.

Таблица 2.1

ВАРИАНТЫ СТРОЕНИЯ БЛИЗЛЕЖАЩИХ ПОРОДНЫХ СЛОЕВ КРОВЛИ

вариант	m_1^K	m_2^K	m_3^K	m_4^K	вариант	m_1^K , м	m_2^K , м	m_3^K , м	m_4^K , м	вариант	m_1^K	m_2^K	m_3^K	m_4^K
	м	м	м	м		м	м	м	м		м	м	м	м
1	0,5	1,5	3	8	8	1,5	1,5	8	4	15	2	1	6	4
2	0,5	2	4	4	9	1,5	0,5	4	8	16	2	6	2	6
3	0,5	3	2	6	10	1,5	8	1,5	2	17	3	0,5	6	3
4	1	3	2	8	11	1,5	4	4	4	18	3	3	3	3
5	1	1	8	2	12	2	4	4	2	19	3	2	4	6
6	1	2	4	6	13	2	1	6	3	20	4	2	8	2
7	1	4	1	4	14	2	2	2	8	21	4	8	1	2

В табл. 2.1 отражена возможность разделения: непосредственной кровли – на два породных слоя, нижний из которых зачастую является ложной кровлей; близлежащей основной кровли – на два-три породных слоя, что нередко встречается в структуре углевмещающей толщи пород Западного Донбасса.

Также в табл. 2.1 введены обозначения мощности m_i^K пород кровли с нумерацией слоев ($i = 1, 2, 3, 4$), начиная от угольного пласта.

2.1.3. СТРОЕНИЕ И МОЩНОСТЬ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Для моделирования максимально достоверной структуры угольного пласта был проведен анализ строения всех разрабатываемых в Западном Донбассе пластов на основе обработки данных работ [85 – 88], которые сведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

**ПАРАМЕТРЫ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ,
РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ НА ШАХТАХ ЗАПАДНОГО ДОНБАССА**

Шахта	Индекс пласта	Общая мощность, м		Строение пласта			
		интервал изменения	средняя	верхняя (средняя) пачка, м	нижняя пачка, м	мощность породных прослоев, м	литотип породных прослоев
«Терновская»	C ₅ ^H	0,70 – 1,01	0,86	–	–	–	–
	C ₆ ^H	0,84 – 1,15	1,00	–	–	–	–
	C ₈ ^H	1,59 – 1,69	1,64	0,75 – 0,85	0,80 – 0,87	0,02 – 0,03	Аргиллит
«Юбилейная»	C ₅	0,96 – 1,00	0,98	–	–	–	–
	C ₆ ¹	0,73 – 0,86	0,80	0,13 – 0,18	0,58 – 0,66	0,02 – 0,03	Аргиллит
«Степная»	C ₆	0,75 – 1,00	0,88	–	–	–	–
	C ₆ ¹	0,55 – 0,74	0,65	0,02 – 0,08	0,47 – 0,64	0,03 – 0,04	Песчаник Аргиллит
«Павлоград- ская»	C ₅	0,85 – 1,19	1,02	–	–	–	–
	C ₆	0,95 – 1,26	1,11	–	–	–	–
«Самарская»	C ₁	0,81 – 0,93	0,87	–	–	–	–
	C ₄	0,79 – 0,92	0,86	–	–	–	–
	C ₅	0,91 – 1,10	1,01	–	–	–	–
им. Героев Космоса	C ₉	1,02 – 1,02	1,02	–	–	–	–
	C ₁₀ ^B	0,80 – 1,00	0,90	0,60 – 1,00	0,00 – 0,26	0,00 – 0,02	Каолин
	C ₁₁	0,80 – 0,84	0,82	0,06 – 0,13 0,26 – 0,28	0,37 – 0,42	0,02 – 0,04 0,03 – 0,04	Каолин
«Днепровская»	C ₈ ^H	0,74 – 0,86	0,80	0,07 – 0,12	0,63 – 0,71	0,02 – 0,03	Песчаник
	C ₈ ^B	0,70 – 1,17	0,94	0,02 – 0,82	0,00 – 0,88	0,00 – 0,26	Аргиллит
	C ₁₀ ^B	1,05 – 1,25	1,15	–	–	–	–
«Западно- Донбасская»	C ₈ ^H	0,97 – 1,05	1,01	0,13 – 0,14	0,77 – 0,87	0,03 – 0,03	Песчаник
	C ₈ ^B	0,56 – 0,67	0,62	–	–	–	–
	C ₁₀ ^B	0,75 – 0,75	0,75	–	–	–	–
им. Н.И. Сташкова	C ₅	0,93 – 1,05	0,99	0,084 – 1,05	–	0,00 – 0,14	Углистый сланец
	C ₆	0,60 – 0,86	0,73	0,52 – 0,86	0,00 – 0,22	0,00 – 0,10	Аргиллит
	C ₁₀ ^B	1,05 – 1,10	1,08	–	–	–	–
«Благодатная»	C ₄	0,90 – 1,22	1,06	0,00 – 0,37	0,45 – 1,02	0,00 – 0,28	Аргиллит
	C ₅	1,10 – 1,27	1,19	–	–	–	–

Анализ структуры угольных пластов проведен по трем направлениям:

- вероятность распределения общей мощности пластов для выявления наиболее характерного интервала ее изменения;
- мощность и литотип породных прослоев в пластах сложного строения;
- вероятность распределения мощности угольных пачек и их количества в пластах сложного строения.

Общая мощность разрабатываемых в Западном Донбассе угольных пластов изменяется от 0,56 до 1,69 м, а ее средние значения (по каждому пласту в пределах конкретного шахтного поля) имеют интервал $0,62 \text{ м} \leq m^y \leq 1,64 \text{ м}$. Для оценки наиболее характерного диапазона колебаний общей мощности угольных пластов выделены интервалы в соответствии с существующей классификацией: менее 0,7 м, 0,7 – 1,2 м и более 1,2 м. Вероятность распределения общей мощности разрабатываемых в Западном Донбассе угольных пластов следующая: весьма тонкие – 7%, тонкие – 89% и пласты средней мощности – 4%. Таким образом, представляется вполне обоснованным моделирование исключительно тонких пластов (в интервале $0,7 \text{ м} \leq m^y \leq 1,2 \text{ м}$), внутри которых наиболее вероятен (83%) более узкий интервал $0,8 \text{ м} \leq m^y \leq 1,1 \text{ м}$, что принято во внимание при составлении вариантов расчета НДС системы «массив – пластовая выработка».

Второе направление анализа, касающееся литотипа и мощности породных прослоев в угольных пластах сложного строения, доставляет следующие результаты. Количество пластов сложного строения составляет до 37% в общем числе разрабатываемых угольных пластов. Преимущественно (77%) породные прослои представлены слабыми породами (аргиллит – 54%, каолин – 18% и углисто-глинистый сланец – 5%) и в меньшей степени (23%) – песчаниками. Породные прослои песчаника весьма выдержаны по мощности в интервале 0,02 – 0,04 м с довольно стабильным средним значением 0,03 м (67%). Очевидно, прослой песчаника такой малой мощности будет разупрочняться (в зонах повышенного горного давления) одновременно с нарушением целостности угольного пласта, так как их прочностные свойства близки друг к другу, а повышенные деформационные характеристики песчаника вызывают формирование на него повышенной нагрузки. Слабые породные прослои не являются концентраторами напряжений ввиду их пониженных деформационных характеристик (одного уровня с угольным пластом). Предположительно влияние прослоя будет зависеть от его мощности, которая изменяется от 0 до 0,28 м. Основной диапазон 0,02 – 0,04 м колебаний мощности породного прослоя встречается в 73% случаев, а в остальных условиях повышенной мощности породного прослоя она не является постоянной в пределах шахтного поля, а стабильно вырождается вплоть до полного исчезновения. Из результатов анализа следует, что наиболее объективным будет моделирование в тестовых расчетах наиболее вероятной мощности породного прослоя 0,03 м, представленного аргиллитом.

Что касается третьего направления анализа, то разрабатываемые в Западном Донбассе угольные пласты сложного строения характеризуются на 91% двухпачечным строением – исключение составляет пласт C_{11} в пределах поля шахты им. Героев Космоса, где верхняя пачка угля имеет мощность всего 0,06 – 0,13 м с нижележащим прослоем из каолина мощностью 0,02 – 0,4 м с близкими к углю деформационными характеристиками. В остальных угольных пластах сложного строения мощность верхних пачек изменяется от 0,00 до 1,05 м, нижних – от 0,00 до 1,02 м. Причем не наблюдается ярко выраженного преобладающего диапазона изменения мощностей верхних и нижних пачек. Поэтому принято решение распределить породный прослой по трем вариантам – в верхней, средней и нижней части угольного пласта и на основе тестовых расчетов НДС системы «массив – пластовая выработка» окончательно сформировать модель угольного пласта.

По итогам анализа строения угольных пластов, разрабатываемых на шахтах Западного Донбасса, считаем целесообразным для предварительных тестовых расчетов, сформировать следующие варианты структур угольного пласта:

- простая структура с мощностью 0,7, 1,0 и 1,2 м;
- сложная структура с постоянной общей мощностью 1,0 м, породным прослоем из аргиллита мощностью 0,03 м и тремя вариантами его расположения (нижняя поверхность прослоя относительно почвы пласта): 0,30, 0,50 и 0,70 м.

В результате последующих тестовых расчетов НДС системы будет окончательно обосновано строение угольного пласта для исследования проявлений горного давления в пластовых выработках шахт Западного Донбасса.

2.1.4. ЛИТОТИП И МОЩНОСТЬ БЛИЗЛЕЖАЩИХ ПОРОДНЫХ СЛОЕВ ПОЧВЫ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

Породы почвы разрабатываемых в Западном Донбассе угольных пластов представлены в основном теми же терригенными породами, что и кровля – аргиллитами, алевролитами и песчаниками. Интересующая нас структура пород почвы на глубину до 10 – 15 м включает, как правило, не более четырех слоев, которые детально исследованы в работе [83]. Установлена общая закономерность периодического изменения (аналогично кровле угольного пласта) литологического состава с увеличением расстояния от почвы пласта. Это выражается в том, что повышенная вероятность залегания аргиллитов наблюдается в нечетных породных слоях (первом и третьем), а более крепкие алевролит и песчаник – в четных породных слоях. Более конкретно по четырем близлежащим породным слоям почвы выявлена следующая вероятность распределения литотипов [83], которую необходимо учитывать при моделировании вариантов структур пород почвы пластовой выработки:

- первый породный слой: аргиллит – 76%, алевролит – 15%, песчаник – 8%;
- второй породный слой: алевролит – 54%, песчаник – 23%, аргиллит – 13%;
- третий породный слой: аргиллит – 46%, алевролит – 21%, песчаник – 15%;
- четвертый породный слой: алевролит – 45%, аргиллит – 23%, песчаник – 21%.

Указанный литологический состав пород почвы обосновывает целесообразность формирования следующих позиций моделирования:

- *первый* породный слой сложен на 91% аргиллитом и алевролитом, которые можно охарактеризовать как слабые породы, склонные к размоканию с весьма выраженными реологическими свойствами; поэтому в дальнейшем первый породный слой почвы следует моделировать с пониженными прочностными и деформационными свойствами;

- *второй* породный слой на 90% сложен алевролитом, песчаником и аргиллитом, которые в среднем имеют более высокие прочностные и деформационные характеристики – этому способствует возросшая вероятность присутствия более крепкого песчаника и то обстоятельство, что с удалением от угольного пласта механические характеристики наиболее слабого аргиллита, как правило, повышаются; ослабляющие факторы увлажнения и реологии действуют менее интенсивно из-за повышенной вероятности присутствия песчаника и пониженной вероятности наличия аргиллита;

- *третий* породный слой представлен терригенными породами на 82% и повышенная вероятность присутствия аргиллита предопределяет понижение механических характеристик по указанным выше факторам; но вероятность наличия аргиллита существенно меньше, чем в первом слое и по этой причине третий слой занимает промежуточное положение по усредненным свойствам между первым и вторым слоями;

- *четвертый* породный слой почвы сложен на 89% терригенными породами, вероятность появления каждого из литотипов несколько выравнивается, а по своим механическим свойствам четвертый слой схож со вторым.

Характеризуя в целом литологический состав близлежащих пород почвы, следует отметить два вывода. *Во-первых*, моделирование только терригенных пород вполне обоснованно, так их вероятность присутствия составляет от 82% (третий слой) до 91% (первый слой без учета песчаника – 8%). *Во-вторых*, угольные пропластки (второй слой – 10%, третий – 18%, четвертый – 11%) по своим прочностным характеристикам занимают промежуточное значение между алевролитом и песчаником, а по деформационным свойствам – между аргиллитом и алевролитом; поэтому они не вносят существенной неоднородности в характер распределения механических характеристик пород почвы, а их учет при расчете НДС системы «массив – пластовая выработка» позволит довести адекватность моделирования второго, третьего и четвертого слоев почвы до 100%.

Следующий этап – оценка наиболее вероятных вариантов строения близлежащих пород почвы на основе анализа данных работы [83], где предложено разбить весь диапазон вариации мощностей породных слоев на пять

интервалов: менее 1 м, 1 – 2 м, 2,1 – 4 м, 4,1 – 6 м и более 6 м. По этим интервалам определена вероятность их появления в каждом из четырех исследуемых породных слоев почвы (табл. 2.3).

В таблице 2.3 введены обозначения мощности m_i^{II} пород почвы с нумерацией слоев ($i = 1, 2, 3, 4$), начиная от угольного пласта.

Таблица 2.3

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО МОЩНОСТИ БЛИЗЛЕЖАЩИХ ПОРОДНЫХ СЛОЕВ ПОЧВЫ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

Номер слоя	Мощность слоя, м				
	1 <	1 – 2	2,1 – 4	4,1 – 6	> 6
m_1^{II}	43%	25%	21%	9%	2%
m_2^{II}	16%	32%	27%	14%	11%
m_3^{II}	22%	29%	24%	10%	15%
m_4^{II}	20%	26%	28%	11%	15%

Из таблицы 2.3 следует, что если учитывать при моделировании четыре первых интервала изменения m_i^{II} (от менее 1 м до 4,1 – 6 м), то будет охвачен весьма представительный диапазон вариации мощности близлежащих пород почвы угольного пласта: первый породный слой – 98%, второй породный слой – 89%, третий и четвертый породные слои – 85%. Такое решение обеспечивает высокую степень достоверности моделирования строения пород почвы угольного пласта. Второй принцип подбора вариантов структуры заключается в отражении вероятности распределения того или иного интервала изменения m_i^{II} для каждого конкретного слоя пород почвы. Третий принцип повышения достоверности моделирования – включение угольных пропластков в варианты изменения мощности второго, третьего и четвертого породных слоев почвы – тогда в этих слоях на 100% будет отражен лито-тип пород почвы.

Помимо обеспечения высокой адекватности строения моделей реальному объекту необходимо найти компромисс многовариантности сочетаний мощностей близлежащих породных слоев почвы:

- с одной стороны, требуется обеспечить возможность выявления закономерностей влияния мощностей m_i^{II} близлежащих породных слоев почвы на НДС системы «массив – пластовая выработка»;

- с другой стороны, необходима определенная ограниченность вариантов расчета для обеспечения «разумных» временных рамок проведения вычислительного эксперимента и последующего анализа его результатов.

Сформулированные принципы легли в основу составления вариантов строения пород почвы угольного пласта, принятых к исследованию НДС системы (табл. 2.4).

Таблица 2.4

**ВАРИАНТЫ МОЩНОСТЕЙ m_i^{Π} БЛИЗЛЕЖАЩИХ
ЛИТОЛОГИЧЕСКИХ РАЗНОСТЕЙ В ПОЧВЕ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА**

вариант	m_1^{Π} , м	m_2^{Π} , м	m_3^{Π} , м	m_4^{Π} , м	вариант	m_1^{Π} , м	m_2^{Π} , м	m_3^{Π} , м	m_4^{Π} , м	вариант	m_1^{Π} , м	m_2^{Π} , м	m_3^{Π} , м	m_4^{Π} , м
1	0,5	1,5	2	5	11	1	3	1,5	3	21	2	4	0,5	1,5
2	0,5	2	4	2	12	1	4	2	2	22	3	0,5	4	1
3	0,5	3	1,5	4	13	1	6	1,5	1,5	23	3	1	1	4
4	0,5	4	6	0,5	14	1,5	0,5	5	4	24	3	3	3	3
5	0,5	5	3	1	15	1,5	1,5	1,5	4	25	4	0,5	2	2
6	0,5	6	1	0,5	16	1,5	3	0,5	3	26	4	1,5	3	0,5
7	0,5	0,5	1	6	17	1,5	5	1	1,5	27	4	1	1	4
8	1	0,5	3	5	18	2	0,5	4	2	28	5	1	1,5	1
9	1	1	1	6	19	2	2	2	2	29	5	4	4	0,5
10	1	2	0,5	6	20	2	1,5	5	1,5	30	6	1,5	6	1

Заключительным моментом при обосновании структуры близлежащей углевмещающей толщи является установление наиболее вероятных условий контакта соседних литологических разностей по плоскостям напластования. Известно [37, 82, 83], что связь литологических разностей углевмещающей толщи характеризуется как слабая, особенно в условиях Западного Донбасса. Ведение горных работ вносит возмущения в исходное поле НДС массива, что приводит к деформированию породных слоев (в окрестности выработок) и их подвижкам, в том числе и в горизонтальном направлении [89, 90]. Поэтому возникает большая вероятность разрушения связи между литологическими разностями вблизи выработок, а общеизвестно, что деформирующиеся породные слои с нарушенными контактами интенсифицируют проявления горного давления. Поэтому на стадии предварительного тестирования моделей системы «массив – пластовая выработка» проведено исследование по сравнению сил сцепления и величины касательных напряжений по поверхностям контактов слоев вблизи выработки, на основе которого смоделирован адекватный характер связи литологических разностей по плоскостям напластования.

2.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СЛАБЫХ ГОРНЫХ ПОРОД В ОКРЕСТНОСТИ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ

Оценив строение близлежащей углевмещающей толщи угольных пластов, разрабатываемых в Западном Донбассе, установим по каждому литотипу наиболее характерные для региона механические свойства. Определяющими факторами данной задачи являются:

- распределение литотипов терригенных пород по слоям близлежащей кровли и почвы угольного пласта;
- выбор наиболее адекватной модели деформирования породы: упругое, упруго-пластическое, предельное и запредельное состояние;
- установление диапазонов изменения механических свойств аргиллитов, алевролитов, песчаников и углей, характерных для Западного Донбасса, в пределах выбранной модели поведения литотипов углевмещающей толщи.

Первый фактор, касающийся распределения литотипов, отчасти описан в §2.1, который расширен в плане обоснования диапазонов изменения крепости породных слоев при удалении от угольного пласта. Здесь использованы данные непосредственных геологических изысканий по ряду шахтных полей, а также работ [70, 86 – 88, 91], анализ которых позволил сформулировать следующие положения:

- разрабатываемые в Западном Донбассе угольные пласты имеют довольно узкий интервал изменения крепости – предел прочности на одноосное сжатие угля составляет $\sigma_{сж}^y = 30...40$ МПа;

- породы непосредственной кровли представлены преимущественно (88%) слабыми аргиллитами и алевролитами, для которых наиболее адекватным интервалом изменения сопротивления сжатию является $5 \leq \sigma_{сж_i}^K \leq 20$ МПа;

- в основной кровле преобладающими становятся алевролиты (45%), которые совместно с песчаниками (22%) несколько повышают (в среднем) прочностные характеристики; однако, из-за присутствия слабых аргиллитов (33%) наиболее объективным интервалом изменения сопротивления сжатию будет $10 \leq \sigma_{сж_i}^K \leq 40$ МПа;

- первый породный слой почвы представлен на 76% слабым аргиллитом, что совместно с некрепким алевролитом (15%) обуславливает его низкое сопротивление сжатию и наиболее адекватно отражающий интервал составляет $5 \leq \sigma_{сж_1}^П \leq 20$ МПа;

- второй, третий и четвертый породные слои почвы характеризуются снижением вероятности появления слабого аргиллита (13 – 46%) и увеличением вероятности сложения более крепкими песчаниками и угольными пропластками (32 – 33%), что сопровождается увеличением (в среднем) прочностных свойств с наиболее целесообразным интервалом изменения сопро-

тивления сжатию $10 \leq \sigma_{сж2,3,4}^II \leq 40$ МПа.

Сформированные интервалы изменения сопротивления сжатию близлежащих пород углевмещающей толщи однозначно указывают на высокую вероятность образования областей предельного и запредельного состояния в окрестности пластовой выработки при соответствующей глубине ее расположения. Поэтому важными представляются исследования по второму фактору – обоснование модели поведения слабых пород Западного Донбасса.

Полувековая история исследований деформирования различных литотипов горных пород, проведенных как в Украине, так и за ее пределами, привела к достаточно однозначному трактованию поведения породы под нагрузкой.

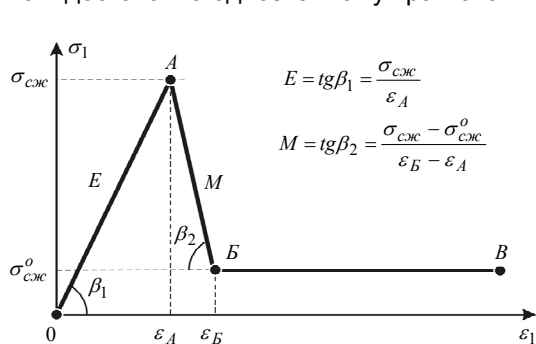


Рис. 2.1. Аппроксимация полной диаграммы деформирования горной породы: **ОА** – допредельное состояние; **АБ** – стадия разупрочнения; **БВ** – стадия разрушения

Обычно графическую иллюстрацию деформирования горной породы приводят для одноосного нагружения [69, 88, 92], а параметры диаграммы в координатах «напряжение σ_1 – относительная деформация ε_1 » принято считать основными характеристиками породы, которые используются при исследованиях трехмерного НДС в совокупности с той или иной теорией прочности горной породы. Линию, описывающую состояние породы в координа-

тах « $\sigma_1 - \varepsilon_1$ » от начала нагружения образца до его полного разрушения, как правило, называют полной диаграммой деформирования. Большинство специалистов считают вполне адекватным отражение реальной диаграммы поведения породы тремя линейными участками (рис. 2.1): *ОА* – стадия упруго-пластического деформирования (допредельное состояние); точка *А* – предельное состояние при одноосном сжатии; *АБ* – участок снижения сопротивления породы сжатию (стадия разупрочнения); *БВ* – участок так называемого «руинного» разрушения породы, сопровождающегося ее увеличением в объеме (стадия разрыхления). Приведенная кусочно-линейная аппроксимация полной диаграммы деформирования характеризуется четырьмя параметрами: *E* – модуль деформации, определяемый как частное от деления сопротивления сжатию $\sigma_{сж}$ на величину упруго-пластической деформации ε_A , накопленной до начала разрушения породы; $\sigma_{сж}^0$ – предел прочности породы на одноосное сжатие, характеризующий наступление ее предельного состояния; *M* – модуль спада, определяемый как частное от деления величины $(\sigma_{сж} - \sigma_{сж}^0)$ на величину относительной деформации ε_B начала разрыхления

породы за вычетом деформации ε_A ; $\sigma_{сж}^o$ – остаточная прочность разрушенной породы, которая мало зависит от величины деформации на стадии разрыхления, то есть, увеличения породы в объеме. Обычно, запредельная стадия деформирования породы характеризуется относительными показателями: $\frac{\sigma_{сж}^o}{\sigma_{сж}}$ – относительная остаточная прочность и $\frac{M}{E}$ – относительный модуль спада, которые использованы в дальнейших исследованиях.

Другой особенностью слабых пород Западного Донбасса является их склонность к ползучести, выражающаяся в весьма длительных процессах развития проявлений горного давления в подземных выработках. Наиболее яркие реологические свойства наблюдаются у аргиллитов и алевролитов, в меньшей степени – у песчаников и угля. Поэтому для повышения адекватности моделирования геомеханических процессов в окрестности пластовых выработок рассмотрена реологическая постановка задачи, учитывающая фактор времени.

Во многих современных компьютерных программах реологическая модель тела описывается обобщенным уравнением ползучести вида

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_y + C_1 \sigma_1^{C_2} t^{C_3}, \quad (2.1)$$

где ε_y – упругая составляющая относительной деформации; для используемой аппроксимации (см. рис. 2.1) $\varepsilon_y = \varepsilon_A$;

t – время нагружения породного образца;

C_1 , C_2 и C_3 – коэффициенты аппроксимации реальной диаграммы ползучести, полученной экспериментально.

Вид уравнения (2.1) отличается от широко используемой для горных пород аппроксимации М.И. Розовского [93] уравнения наследственной пластичности Ю.Н. Работнова [94]. Однако, подбором коэффициентов C_1 и C_3 удастся достаточно точно описать экспериментальную диаграмму ползучести конкретного литотипа породы по соответствующим критериям подобия Фишера [95, 96].

Таким образом, предпринята попытка смоделировать основные особенности поведения слоистого массива слабых пород в окрестности пластовой выработки.

Третья составляющая задачи заключается в выборе наиболее адекватных диапазонов изменения механических характеристик пород Западного Донбасса и построении необходимого для достоверной оценки количества вариантов сочетаний механических свойств породных слоев близлежащей углевмещающей толщи. Все многообразие вариантов разделено на три позиции: угольный пласт, породные слои кровли и почвы; при этом использованы данные [69, 70, 86 – 88, 91].

Для угольных пластов характеристики допредельного состояния достаточно стабильны: $\sigma_{сж}^y = 30 \dots 40$ МПа, $E^y = (0,30 \dots 0,35) \cdot 10^4$ МПа; характеристики запредельного состояния исследованы в гораздо меньшей степени, но, учитывая результаты отдельных экспериментов и повышенную хрупкость угля, можно оценить интервалы вариации так: $\frac{(\sigma_{сж}^y)^p}{\sigma_{сж}^y} = 0,05 \dots 0,10$; $\frac{M^y}{E^y} = 2 \dots 3$. По

указанным интервалам построены три варианта (табл. 2.5) механических характеристик угля, которые использованы для предварительного тестирования модели системы «массив – пластовая выработка».

Таблица 2.5

ВАРИАНТЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

Варианты	Механические характеристики			
	$\sigma_{сж}^y$, МПа	$E^y \cdot 10^4$, МПа	$(\sigma_{сж}^y)^p / \sigma_{сж}^y$	M^y / E^y
1	30	0,30	0,10	2,0
2	40	0,35	0,05	3,0
3	35	0,33	0,08	2,5

Близлежащие породные слои кровли и почвы угольного пласта представлены одними и теми же литологическими разностями, поэтому диапазоны колебаний механических характеристик будут одинаковыми для кровли и почвы. Анализ данных большого числа испытаний породных образцов позволил установить наиболее адекватные интервалы изменения механических характеристик допредельного и запредельного состояния терригенных пород Западного Донбасса (табл. 2.6).

Таблица 2.6

ДИАПАЗОНЫ ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД

Тип породы	Механические характеристики			
	$\sigma_{сж}^y$, МПа	$E^y \cdot 10^4$, МПа	$\sigma_{сж}^o / \sigma_{сж}$	M / E
Аргиллит	5 – 25	0,2 – 1,0	0,10 – 0,25	0,5 – 1,7
Алеврит	10 – 35	0,4 – 1,5	0,08 – 0,20	1,0 – 3,0
Песчаник	30 – 45	0,8 – 2,0	0,05 – 0,15	2,0 – 5,0

Варианты сочетания механических характеристик в кровле и почве (табл. 2.7 и 2.8), предназначенные для расчета НДС системы «массив – пластовая выработка», помимо охвата основного диапазона вариации соответствуют вероятности распределения литотипов по близлежащим породным слоям и обеспечивают возможность последующего проведения корреляционно-дисперсионного анализа.

Таблица 2.7

ВАРИАНТЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛИЗЛЕЖАЩИХ ПОРОДНЫХ СЛОЕВ КРОВЛИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

Варианты	Породные слои кровли							
	Первый				Второй			
	$\sigma_{сж1}^K$, МПа	$E_1^K \cdot 10^4$, МПа	$\left(\frac{\sigma_{сж1}^K}{\sigma_{сж1}^K}\right)^0$	$\frac{M_1^K}{E_1^K}$	$\sigma_{сж2}^K$, МПа	$E_2^K \cdot 10^4$, МПа	$\left(\frac{\sigma_{сж2}^K}{\sigma_{сж2}^K}\right)^0$	$\frac{M_2^K}{E_2^K}$
1	5	0,3	0,2	0,5	5	0,3	0,2	0,5
2	5	0,6	0,15	1	10	0,6	0,15	1
3	5	0,3	0,25	0,5	40	2	0,15	2
4	10	0,6	0,2	1	10	0,6	0,2	1
5	10	0,6	0,2	1	20	1	0,15	2
6	10	0,6	0,2	1,5	30	1,5	0,1	3
7	10	0,3	0,25	0,5	5	0,3	0,25	0,5
8	10	0,6	0,2	1	10	0,6	0,2	1
9	20	1	0,15	2	5	0,3	0,2	0,5
10	20	1	0,15	1,5	10	0,6	0,2	1
11	20	1	0,15	2	20	1	0,15	2
12	30	1	0,05	3	10	0,6	0,2	1
13	30	1,5	0,1	3	20	1	0,15	2
14	40	2	0,05	5	40	2	0,05	5

Продолжение таблицы 2.7

Варианты	Породные слои кровли							
	Третий				Четвертый			
	$\sigma_{сж3}^K$, МПа	$E_3^K \cdot 10^4$, МПа	$\left(\frac{\sigma_{сж3}^K}{\sigma_{сж3}^K}\right)^0$	$\frac{M_3^K}{E_3^K}$	$\sigma_{сж4}^K$, МПа	$E_4^K \cdot 10^4$, МПа	$\left(\frac{\sigma_{сж4}^K}{\sigma_{сж4}^K}\right)^0$	$\frac{M_4^K}{E_4^K}$
1	10	0,6	0,15	1,5	10	0,6	0,15	1,5
2	20	1	0,1	2	40	2	0,05	5
3	10	0,6	0,2	1	20	1	0,15	1,5
4	30	1,5	0,1	3	30	1,5	0,1	3
5	20	0,6	0,2	1,5	10	0,3	0,25	0,5
6	40	2	0,05	5	10	0,6	0,15	2
7	30	1	0,15	3	30	1	0,10	3
8	10	0,6	0,2	1	10	0,6	0,2	1
9	20	1	0,15	2	20	0,6	0,15	1
10	30	1,5	0,15	3	20	1	0,15	2
11	20	1	0,15	2	20	1	0,15	2
12	10	0,6	0,15	1,5	40	2	0,05	3
13	10	0,6	0,2	1	10	0,3	0,2	0,5
14	40	2	0,05	5	40	2	0,05	5

Таблица 2.8

ВАРИАНТЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛИЗЛЕЖАЩИХ ПОРОДНЫХ СЛОЕВ ПОЧВЫ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

Варианты	Породные слои почвы							
	Первый				Второй			
	$\sigma_{сж1}^П$, МПа	$E_1^П \cdot 10^4$, МПа	$\left(\frac{\sigma_{сж1}^П}{\sigma_{сж1}^П}\right)^0$	$\frac{M_1^П}{E_1^П}$	$\sigma_{сж2}^П$, МПа	$E_2^П \cdot 10^4$, МПа	$\left(\frac{\sigma_{сж2}^П}{\sigma_{сж2}^П}\right)^0$	$\frac{M_2^П}{E_2^П}$
1	5	0,3	0,2	0,5	10	0,6	0,15	2
2	5	0,3	0,25	0,5	20	1,5	0,1	3
3	5	0,6	0,15	1	20	1	0,15	2
4	5	0,3	0,2	0,5	10	0,6	0,15	2
5	5	0,3	0,25	0,5	40	2	0,05	5
6	5	0,3	0,2	0,5	40	2	0,1	3
7	10	0,6	0,15	1	10	0,6	0,15	1
8	10	0,3	0,2	0,5	10	0,6	0,15	1
9	10	0,3	0,2	1	10	0,3	0,2	1
10	10	0,6	0,15	1,5	20	1	0,15	2
11	10	1	0,15	1,5	20	1,5	0,15	3
12	10	0,3	0,25	0,5	40	2	0,05	5
13	10	0,6	0,15	1	40	1,5	0,1	3
14	20	1	0,15	2	40	2	0,1	3
15	20	1,5	0,1	3	10	0,3	0,25	0,5
16	20	1	0,2	1	40	2	0,1	3
17	20	1	0,15	1	10	1	0,15	1
18	20	1	0,2	1	40	2	0,1	3

Продолжение таблицы 2.8

Варианты	Породные слои почвы							
	Третий				Четвертый			
	$\sigma_{сж3}^П$, МПа	$E_3^П \cdot 10^4$, МПа	$\left(\frac{\sigma_{сж3}^П}{\sigma_{сж3}^П}\right)^0$	$\frac{M_3^П}{E_3^П}$	$\sigma_{сж4}^П$, МПа	$E_4^П \cdot 10^4$, МПа	$\left(\frac{\sigma_{сж4}^П}{\sigma_{сж4}^П}\right)^0$	$\frac{M_4^П}{E_4^П}$
1	10	0,6	0,2	1	10	0,6	0,15	2
2	10	0,3	0,2	0,5	20	1	0,15	2
3	20	1	0,15	2	20	1	0,15	2
4	40	2	0,1	3	40	2	0,1	3
5	20	0,6	0,2	1,5	10	0,3	0,25	0,5
6	10	0,6	0,2	1	40	2	0,1	3
7	10	0,6	0,15	1	10	0,6	0,15	1
8	10	0,3	0,2	0,5	40	2	0,05	5
9	40	2	0,05	5	40	2	0,05	5
10	40	1	0,15	3	20	1	0,15	2
11	10	0,3	0,2	0,5	20	1,5	0,15	3
12	10	0,3	0,25	0,5	40	2	0,05	5
13	40	1,5	0,1	3	10	0,6	0,15	1
14	40	2	0,1	3	20	1	0,15	2
15	20	1,5	0,1	3	40	2	0,05	5
16	10	0,6	0,2	1	10	0,6	0,15	2
17	10	1	0,15	1	20	1	0,15	1
18	20	1	0,2	1	40	2	0,1	3

В итоге обоснованы структура и свойства близлежащей углевмещающей толщи, которые наиболее адекватно отражают горно-геологические условия угольных пластов, разрабатываемых в Западном Донбассе. Многообразие вариантов расчета НДС системы, порожденное большим количеством учитываемых параметров, предварительно тестируется на предмет выявления факторов, не существенно влияющих на проявления горного давления в пластовой выработке, и ограничения, тем самым, набора вариантов расчета до технически реализуемого объема.

2.3. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТОВЫХ ВЫРАБОТОК И ИХ КРЕПИ

Объект исследований – пластовые подготовительные выработки имеют ряд общих параметров, обусловленных их назначением в технологической схеме функционирования угольной шахты.

Во-первых, все выработки проводятся (по восстанию, падению и простиранию) по пласту угля с верхней (кровля) или чаще комбинированной подрывкой кровли и почвы. Это означает, что в боках выработки размещается угольный пласт с углом наклона в ее поперечном сечении от 0° (выработки, проведенные по восстанию и падению пласта) до 6° – максимальный угол падения пластов в Западном Донбассе (выработки, проведенные по простиранию). Величина подрывки пород почвы основных подготовительных выработок обычно не превышает 1 м, (выемочных штреков – 1,5 м). Таким образом, ориентировка пластовой выработки относительно угольного пласта характеризуется следующими диапазонами изменения: угол наклона пласта в сечении выработки $\alpha = 0 \dots 6^\circ$, глубина подрывки почвы $h_{II} = 0 \dots 1,5$ м. В работе [97] проанализировано влияние указанных параметров путем тестовых расчетов НДС системы «массив – пластовая выработка» и сделан вывод о незначительном их влиянии в

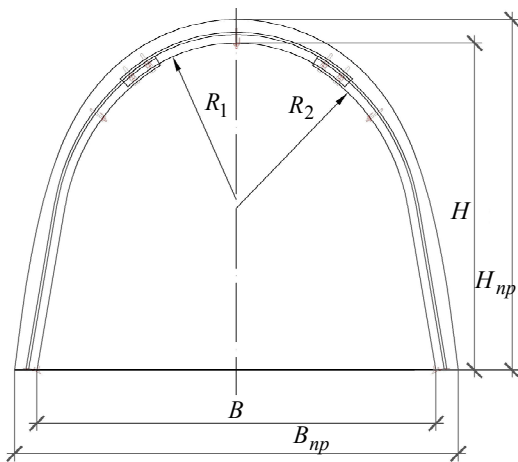


Рис. 2.2. Схема выработки с рамной крепью серии КШПУ

отмеченных диапазонах изменения; поэтому представляется целесообразным зафиксировать для дальнейших исследований угол наклона пласта в сечении выработки $\alpha = 0^\circ$ и глубину подрывки почвы $h_{II} = 1,0$ м.

Во-вторых, форма пластовой подготовительной выработки и соответствующие им типы крепей на шахтах Западного Донбасса не отличаются разнообразием – подавляющее распространение (до 82,7%) получила податливая металлическая арочная трехзвенная крепь шатровой формы с удлиненными стойками серии КШПУ [98]. Типовые сечения пластовых подготовительных выработок различного назначения (от выемочных до магистральных штреков, ходков, бремсбергов и уклонов) как правило, изменяются в диапазоне от КШПУ-9,5 до КШПУ-20,2, который мы приняли к исследованию для адекватного моделирования горнотехнических условий. На рис. 2.2 и в табл. 2.9 приведены размеры типовых сечений, которые будут отображены во всех деталях шатровой формы. Требование точного отражения реальных конструктивных особенностей крепи и межрамного ограждения состоит в достоверном моделировании:

- геометрии спецпрофиля СВП, из которого изготавливаются крепь КШПУ; в зависимости от назначения подготовительной выработки и степени устойчивости вмещающих пород на шахтах Западного Донбасса применяются СВП-19, 22, 27, 33;
- конструкции замка податливости, обеспечивающего рациональный режим взаимодействия крепи со слабыми вмещающими породами;
- конструкции опорной плиты (подпятника) под стойки рамы, ограничивающей их вдавливание в слабые породы почвы;
- шага установки рамной крепи вдоль выработки, который обычно составляет 0,5, 0,8 и 1,0 м;
- конструкции межрамного ограждения.

Таблица 2.9

ПАРАМЕТРЫ ТИПОВЫХ СЕЧЕНИЙ, ПРИНЯТЫХ К ИССЛЕДОВАНИЮ

Типоразмер КШПУ	H_{np} , мм	H , мм	B_{np} , мм	B , мм	Площадь сечения, м ²		R_1 , мм	R_2 , мм
					в проходке проектная	в свету		
9,5	3240	3040	4350	3880	11,2	8,8	1650	2110
10,5	3500	3300	4520	4050	11,8	10,5	1580	2060
11,0	3290	3090	4940	4470	12,7	11,2	2030	2445
11,7	3660	3460	4780	4310	13,1	11,8	1775	2110
12,1	3640	3440	4880	4410	13,4	12,1	1800	2990
13,6	3660	3460	5410	4940	15,6	13,8	2280	2700
14,4	4093	3880	5226	4730	16,0	14,4	1850	2445
15,0	3853	3640	5676	5180	17,1	15,3	2380	2700
17,7	4403	4190	5856	5360	19,6	17,7	2240	2700
20,2	4633	4420	6196	5700	22,7	20,7	2530	3100

В-третьих, общим принципом моделирования свойств элементов системы «массив – пластовая выработка» и, в частности, крепи с межрамным ограждением является описание всех стадий поведения материалов (от упругого состояния до полного разрушения), то есть для крепежных материа-

лов также используются полные диаграммы « $\sigma_1 - \varepsilon_1$ » деформирования, что продиктовано реально наблюдаемыми на практике процессами появления областей пластического состояния в раме, и разрушения межрамного ограждения. Для рамной крепи смоделирована реальная диаграмма нагружения стали Ст.5 (из которой изготавливается спецпрофиль СПВ) используя данные [56, 92]: упругие характеристики допредельной стадии – модуль упругости $E^P = 21 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu^P = 0,3$; стадия практически идеальной пластичности (площадка текучести) наступает когда интенсивность напряжений σ возрастает до уровня предела текучести $\sigma_T = 270$ МПа; при дальнейшем увеличении σ сталь Ст.5 переходит в стадию упрочнения до величины временного сопротивления разрыву $\sigma^6 = 500 \dots 620$ МПа.

Особенность деформирования затяжки межрамного ограждения заключается в том, что испытывая под нагрузкой свободный прогиб в полость выработки (между соседними рамами), при наступлении предельного состояния ($\sigma = \sigma_{сж,р}^3$) происходит ее хрупкое разрушение в районе срединного сечения пролета, в результате чего затяжка практически теряет свою несущую способность (здесь обозначено через $\sigma_{сж,р}^3$ – сопротивление сжатию камня железобетонной затяжки и сопротивление растяжению деревянной затяжки). Поэтому, для материалов затяжки целесообразно использовать модель идеально хрупкого тела, характеризующегося в запредельном состоянии нулевой остаточной прочностью и модулем спада, стремящимся к бесконечности. Остальные механические характеристики затяжки следующие: железобетонная – модуль деформации $E^3 = 2 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu^3 = 0,17$, предел прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}^3 = 20$ МПа; деревянная (сосна) – модуль деформации $E^3 = 1,4 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu^3 = 0,20$ предел прочности на растяжение $\sigma_p^3 = 80$ МПа.

Закрепное пространство моделируется среднестатистической ширины 0,17 м (как это принято в проектной документации) и имеет механические характеристики в соответствии с применяемыми материалами:

- при заполнении закрепного пространства твердеющими смесями механические характеристики отвердевшего камня определяются в зависимости от рецептуры смеси по рекомендациям [100];

- при заполнении закрепного пространства бутовым камнем непосредственно используется диаграмма « $\sigma_1 - \varepsilon_1$ » уплотнения разрушенной породы в стесненных условиях [61], которая построена по результатам экспериментальных исследований [101] деформирования бутовых охранных полос на шахтах Западного Донбасса.

Таким образом, обоснованные параметры пластовых выработок и их крепи являются заключительным этапом предварительного построения общей гео-

механической модели системы «массив – пластовая выработка», подлежащей дальнейшей модернизации на основании предстоящего тестирования.

ВЫВОДЫ

1. Выполнено обоснование математической модели, отражающей геомеханику поведения углевмещающего массива слабых пород Западного Донбасса в окрестности пластовой подготовительной выработки, закрепленной рамной податливой крепью серии КШПУ. Адекватность и достоверность последующих расчетов НДС системы «массив – пластовая выработка» обеспечена поэтапной и детальной отработкой всего комплекса особенностей, существенно влияющих на процесс силового взаимодействия составляющих элементов: диапазоны изменения структуры близлежащих пород кровли и почвы, условия на контактах литологических разностей, диапазоны изменения структуры угольных пластов, максимально достоверное отражение свойств породы и угля по полной диаграмме их деформирования с соответствующими диапазонами изменения механических характеристик, моделированием реальной конструкции крепи и межрамного ограждения с обоснованием необходимых идеализаций для обеспечения устойчивости процедуры расчетов МКЭ и другие позиции [104, 105].

2. Близлежащие (на высоту в кровлю и глубину в почву до 10 – 15 м) породные слои разрабатываемых в Западном Донбассе угольных пластов сложены в основном слабыми аргиллитами и алевролитами и в меньшей степени песчаниками средней крепости, закономерности изменения структуры которых учтены в разработанной модели. Для этого построен массив расчетных вариантов структур, одновременно отражающих вероятность распределения литотипов и их мощности по породным слоям непосредственной и основной кровли и почвы, что максимально приближает геомеханическую модель к реальным горно-геологическим условиям поддержания пластовых выработок на шахтах Западного Донбасса.

3. В соответствии с вероятностью распределения литологических разностей по близлежащим породным слоям кровли и почвы угольных пластов сформирован массив расчетных вариантов механических характеристик, описывающих полную диаграмму деформирования пород Западного Донбасса, наиболее адекватно отражающую все стадии состояния горной породы от упруго-пластической до разрыхления.

3. ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «МАССИВ – ПЛАСТОВАЯ ВЫРАБОТКА»

Обоснование параметров системы, наиболее адекватно отражающих реальные горно-геологические и горнотехнические условия эксплуатации пластовых выработок, привело к появлению чрезвычайно большого количества вариантов сочетаний различных параметров из-за попытки их одновременного учета. Поэтому первая задача предварительного тестирования модели заключалась в выявлении тех параметров, которые (при заданной степени точности горнотехнических расчетов) могут быть усреднены. Критерием оценки степени влияния того или иного параметра является предмет исследования – процесс развития пучения почвы пластовой выработки. Вторая задача – обоснование объективных параметров силового взаимодействия элементов системы «массив – пластовая выработка», например, степень нарушения контактов между соседними слоями, режим работы податливой крепи и ее взаимодействие с приконтурными породами через межрамное ограждение и т.п. Третья задача – качественная оценка соответствия тестовых расчетов НДС системы сложившимся представлениям о деформировании массива в окрестности выработки. Сформулированные задачи разделены по двум основным составляющим системы – вмещающий массив и пластовая выработка с крепью и межрамным ограждением.

3.1. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕГО ПОРОДНОГО МАССИВА

Первый этап тестирования модели системы «массив – пластовая выработка» – обоснование ее минимально допустимых размеров в пространстве, позволяющих, с одной стороны, получать достоверные результаты расчетов, а с другой, – экономить вычислительный ресурс для требуемой детализации отражения особенностей элементов системы. Условие выбора минимальных размеров модели – колебания компонент напряжений на ее поверхностях, обусловленные краевыми эффектами от граничных условий нагружения, не должны вносить существенной погрешности в НДС приконтурных пород и крепи выработки. При выполнении горнотехнических расчетов считается вполне допустимой погрешность 10%, что вызвано некоторой неопределенностью из-за вариации механических свойств массива в пространстве. При этом следует учесть достаточно стабильную закономерность: колебания компонент напряжений на поверхностях модели сказывается на НДС приконтурных пород и крепи, как правило, на порядок слабее, что во многом обеспечивает минимальную погрешность вычислительного эксперимента.

Для примера реализации изложенных положений выбраны эпюры интенсивности приведенных напряжений σ (рис. 3.1, а), как интегрального параметра, наиболее полно отражающего состояние массива (в дальнейшем, во избежание путаницы с классическим понятием «интенсивность напряжений» в механике твердого деформируемого тела, величину σ будем называть приведенным напряжением, определяемым в соответствии с апробированной для горных пород теорией прочности Кулона-Мора). *Первая задача* – оценить, на какое расстояние в плоскости XY распространяются возмущения σ , вызванные проведением выработки. При этом расчеты НДС системы выполнены в упругой постановке, генерирующей, как известно, максимальное распространение и величину концентрации напряжений σ . Полное исключение влияния выработки наблюдается: на высоте 12,1 м в кровле, на глубине 16,0 м в почве и ширине 10,4 м в боках. Если ограничить размеры модели по ширине до $X = 13$ м и высоте до $Y = 18$ м (с учетом размеров выработки), то колебания σ по боковым вертикальным поверхностям достигают 14%, а по горизонтальным поверхностям – до 20%; однако эти колебания вносят погрешность в НДС приконтурных пород не более 1,7%, что вполне допустимо. Тем не менее, с учетом вариации структуры и свойств близлежащей углевмещающей толщи (возможен рост области влияния выработки) с определенным запасом точности и надежности расчетов выбраны размеры модели по высоте $Y = 30$ м и ширине $X = 20$ м для дальнейших исследований. Толщина модели (по осевой координате Z длины выработки) выбирается по тем же критериям и здесь определяющую роль играет дискретно устанавливаемая вдоль выработки рамная крепь, генерирующая возмущения поля НДС в ней самой и приконтурных породах. Расчеты показали, что при моделировании пяти рам вдоль оси выработки (толщина модели до 4 м) три центральные рамы имеют колебания σ (относительно друг друга), не превышающие 7,2%, а в приконтурных породах на длине трех центральных рам отличия σ составляют не более 3%.

Таким образом, на основе тестовых расчетов НДС системы «массив – пластовая выработка» доказано, что достаточную точность вычислений обеспечивают следующие размеры модели: $Y = 30$ м, $X = 20$ м, $Z = 4$ м.

Следующим этапом тестирования являлось изучение условий контакта по поверхностям литологических разностей и обоснование моделирования параметров силового взаимодействия по плоскостям напластования в окрестности выработки. Этот вопрос для горно-геологических условий Западного Донбасса достаточно детально изучен в работе [97], где на трех вариантах структуры и различных сочетаниях деформационных характеристик близлежащих породных слоев углевмещающей толщи проанализировано поле распределения касательных напряжений τ_{xy} , в том числе и по плоскостям напластования. Показано, что уже на глубине 200 м только действие одних касательных напряжений приводит к нарушению связи и проскальзыванию слоев относительно друг друга на расстоянии 6 – 10 м от контура выработки.

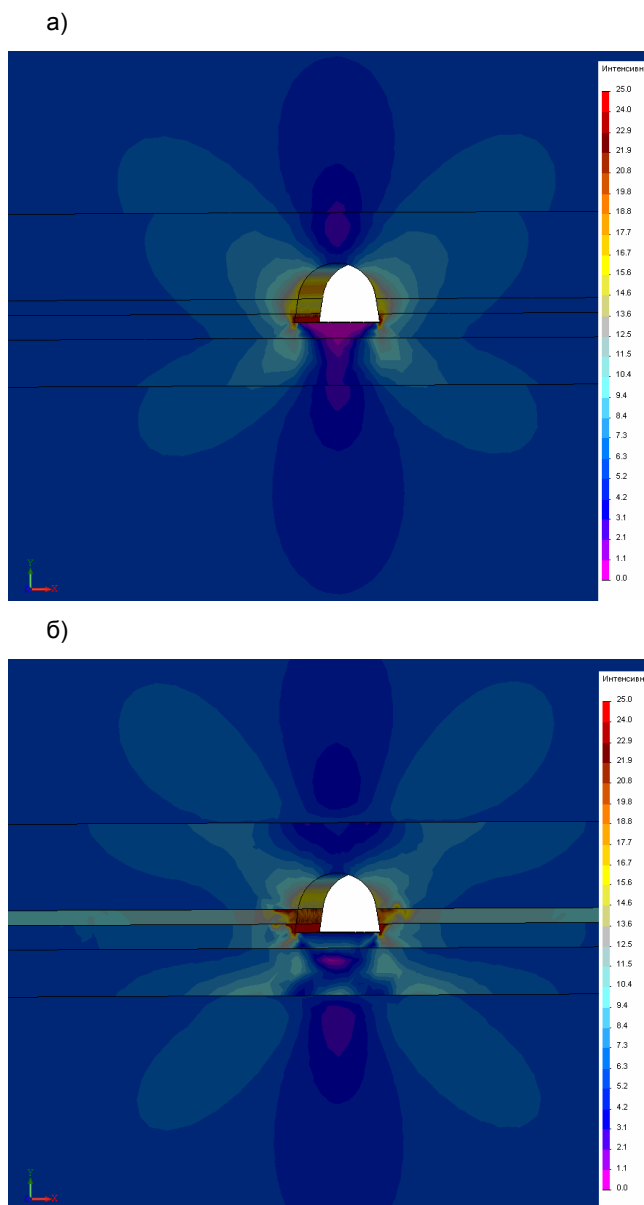


Рис. 3.1. Эпюры приведенных напряжений σ при ненарушенных (а) и нарушенных (б) контактах между литологическими разностями

К касательным напряжениям τ_{xy} добавляется действие (в ряде областей) растягивающих вертикальных σ_y и горизонтальных σ_x напряжений, которыми контакты породных слоев с пониженными прочностными свойствами практически не сопротивляются, а с увеличением глубины расположения выработки данные процессы усиливаются. В результате, авторы [97] пришли к выводу, что для углевмещающей породной толщи пластов в Западном Донбассе, наиболее объективным будет моделирование нарушенных контактов между породными слоями вблизи выработки, хотя такая постановка задачи существенно увеличивает требуемые вычислительные ресурсы.

Адекватность моделирования геомеханических процессов в окрестности пластовой выработки представляет интерес, прежде всего, с точки зрения степени влияния на НДС системы нарушения связи между породными слоями по плоскостям напластования. Для оценки этого влияния были проведены расчеты одной и той же структуры массива по двум вариантам – с нарушенными и ненарушенными контактами между слоями. Сравнительный анализ поля σ во вмещающем пластовую выработку породном массиве дал следующие результаты. Прежде всего, ярко выражены перепады σ (которые в основном генерируются горизонтальными напряжениями σ_x) при переходе от одной литологической разности к другой, что обусловлено частично свободным прогибом каждого из слоев при нарушении контакта между ними. Это, с одной стороны, подтверждает соответствие модели классическим положениям механики твердого деформированного тела, а, с другой стороны, указывает на общее повышение интенсивности возмущений и степени их неравномерности в окрестности пластовой выработки.

Прогиб непосредственной кровли, потерявшей сцепление с основной, расширяет зону разгрузки в кровле выработки в 1,4 – 1,6 раза, а геостатическое давление передается на породы в боках, что особенно проявляется в угольном пласте и породных слоях почвы: на расстоянии более ширины выработки приведенные напряжения в угольном пласте увеличиваются в 1,5 – 2,5 раза, а концентрация $\sigma = 11,5 \dots 12,5$ МПа распространяется во втором породном слое почвы на ширину до 3 раз и глубину до 2,7 раза, превышающую таковую при ненарушенных контактах между слоями. Концентрация напряжений $\sigma > 20$ МПа в боках выработки распространяется на ширину до 0,6 м в непосредственной почве и до 1,5 м в угольном пласте, чего не наблюдается при целостных контактах между слоями; а разгруженная ранее почва выработки ($\sigma < 3$ МПа) подвержена воздействию σ до 12 МПа, что при слабых породах интенсифицирует ее пучение. Такой результат повышения интенсивности напряжений в боках и почве выработки объясняется (в соответствии с законом сохранения энергии) перераспределением части геостатического давления из зоны разгрузки в кровле на боковые породы, а от них – на почву. Другой вывод отмеченного явления – нельзя игнорировать существенное повышение НДС в боках и почве выработки, а для этого следует моделировать

нарушение контактов между литотипами вблизи выработки.

В целом, характер распределения компонент напряжений соответствует существующим представлениям о процессах сдвижения углевещающей толщи в окрестности выработки [67, 68, 102, 103]: в кровле и почве образуются зоны разгрузки с появлением растягивающих напряжений σ_y и σ_x ; в боках формируются зоны повышенного горного давления; наблюдается изменение знака касательных напряжений τ_{xy} относительно вертикальной оси выработки и зеркальное отражение поля τ_{xy} относительно оси, наклоненной под углом 45° , что обусловлено горизонтальным залеганием пласта, близким к горизонтальному, и совпадением векторов главных напряжений σ_1 и σ_3 с векторами σ_y и σ_x .

Следующий этап тестирования – оценка степени влияния мощности и структуры угольных пластов, обрабатываемых в Западном Донбассе. Исследование влияния мощности (в диапазоне $m^y = 0,7 \dots 1,7$ м) угольных пластов на НДС пород, вмещающих пластовую выработку, и рамной крепи было проведено в работе [97], где изучено изменение каждой компоненты напряжений в наиболее значимых областях: зонах разгрузки в кровле и почве, повышенного горного давления в боках выработки, рамной крепи и т.п. Обоснованный нами наиболее представительный диапазон изменения $0,7 \text{ м} \leq m^y \leq 1,2 \text{ м}$, более узкий, чем в [97], о допустимости усреднения мощности пласта величиной $m^y = 1$ м тем более справедлив для исследования поставленной задачи.

Вторая часть этапа – оценка влияния сложного строения угольного пласта (37% случаев в Западном Донбассе). Для этого была построена геомеханическая модель с наиболее «экстремальным» сочетанием параметров структуры угольного пласта (прослой песчаника мощностью 0,12 м расположен в верхней трети мощности пласта) для выявления максимально возможных возмущений НДС. На эпюре приведенных напряжений σ отчетливо прослеживается повышенная напряженность породного слоя, что обусловлено: значительной разницей (до шести раз) модулей деформации песчаника и угля, когда более жесткий элемент (прослой песчаника) воспринимает на себя повышенную нагрузку; малой мощностью прослоя, опирающегося на основание (уголь) пониженной жесткости – возникают значительные изгибные напряжения. Однако возмущения НДС имеют весьма ограниченное распространение и локализуются практически в самом породном прослое: каких-либо существенных изменений НДС в приконтурных породах и рамной крепи зафиксировано не было. Учитывая, что угольные пласты (см. табл. 2.2) сложного строения в Западном Донбассе не являются преобладающими, а породный прослой чаще всего представлен аргиллитом (сходные с углем деформационные характеристики) с наиболее вероятной мощностью 0,03 м, принято решение о неучете породных прослоев при моделировании параметров угольного пласта.

Выполненные тестовые расчеты выявили факт незначительного влияния выработки на НДС крайних (четвертых) слоев кровли и почвы, параметры которых можно усреднить и исключить из набора вариантов расчета в дальнейших исследованиях. С другой стороны, набранная статистика расчетов еще не позволяет окончательно судить о незначительном влиянии крайних слоев почвы и кровли на процесс пучения и устойчивость рамной крепи. Поэтому вопрос об усреднении параметров крайних слоев модели будет решен по результатам последующей группы вычислительных экспериментов при моделировании полной диаграммы деформирования элементов системы «массив – пластовая выработка» с различным сочетанием механических характеристик – тогда подтверждение предполагаемого факта позволит существенно снизить количество расчетных вариантов сочетаний параметров системы.

Последний этап тестирования НДС вмещающего массива касается учета его реологических свойств. Здесь была проведена серия расчетов НДС системы «массив – пластовая выработка» с использованием программы Solid Works 2009 Simulation, учитывающей реологические свойства горных пород по уравнению (2.1), которые выявили следующие факты. Во-первых, учет фактора времени существенно усложняет задачу, которая и без этого не отличается простотой из-за детального отражения конструктивных параметров элементов системы, описания их механических свойств по полной диаграмме деформирования с условием нарушения контактов между литологическими разностями. Такая постановка требует значительного увеличения вычислительных ресурсов, и время расчета одного варианта возрастает до 100 – 150 часов и более. Во-вторых, отмечена низкая надежность самого процесса вычислений, когда программа дает сбой на любом временном отрезке и приходится вновь и вновь повторять расчет одного и того же варианта исходных данных. В совокупности эти факторы привели к ситуации, когда несколько «удачных» расчетов затребовали затрат времени, сравнимых с периодом развития ползучести горных пород в Западном Донбассе. Несмотря на достаточную адекватность полученных результатов моделирования натурным наблюдениям развития процесса ползучести горных пород в окрестности выработки, такое положение вещей не может быть признано удовлетворительным, так как для установления геомеханических закономерностей требуется набор расчетных вариантов, как минимум на два порядка больше, чем получено в результате весьма продолжительных тестовых расчетов. Выход из данной ситуации найден на основе компромиссного решения учета реологического фактора путем снижения значений механических характеристик породы при длительном нагружении на основе исследований [70, 83, 91]:

– предел длительной прочности породы

$$\left(\sigma_{сж_i}^{K,II}\right)_{\infty} = \sigma_{сж_i}^{K,II} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{\beta}\right)_i^{K,II}} ; \quad (3.1)$$

– длительный модуль деформации

$$\left(E_i^{K,\Pi}\right)_{\infty} = E_i^{K,\Pi} \left[1 - \left(\frac{x}{\beta}\right)_i^{K,\Pi} \right], \quad (3.2)$$

где $\left(\frac{x}{\beta}\right)_i^{K,\Pi}$ – реологический показатель, для которого установлена корреляционная связь с пределом прочности породы на одноосное сжатие

$$\left(\frac{x}{\beta}\right)_i^{K,\Pi} = 0,8 - 0,326 \lg \sigma_{сжi}^{K,\Pi}. \quad (3.3)$$

Пониженные механические характеристики закладываются в расчет, и таким образом в интегральной форме учитывается конечное воздействие реологического фактора на состояние системы «массив – пластовая выработка».

3.2. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ И КРЕПИ

В задачи данного этапа тестирования геомеханической модели системы «массив – пластовая выработка» входит определение степени влияния на пучение почвы выработки и состояние ее крепи следующих факторов: угол наклона пласта в поперечном сечении выработки, глубина подрывки почвы пласта, модели замка податливости рамы и межрамного ограждения.

Влияние первого фактора изучалось на двух моделях – с параллельным расположением пласта относительно почвы выработки (подготовительные выработки, пройденные по восстанию и падению пласта) и с углом наклона 6° соответствующему максимальному углу падения пластов в Западном Донбассе (подготовительные выработки, пройденные по простиранию пласта). Установлено несущественное увеличение приведенных напряжений σ (до 7 – 12%) в приконтурных породах боков выработки на ширину до 0,4 – 0,7 м со стороны восстания пласта. Возникает некоторая асимметрия в форме зон разгрузки в кровле и почве выработки (относительно ее вертикальной оси), но практически без изменения их размеров. В рамной крепи влияние угла наклона пласта проявляется только в районе опор стоек, но не носит сколь-нибудь заметного характера. Такой результат отчасти согласуется с работами [61, 84, 97] в том плане, что более существенная (до 15 – 18%) асимметрия пучения почвы выработки и деформирования стоек рам проявляется только в условиях крайне неустойчивых вмещающих пород, когда потеря сечения выработки достигает 40 – 50% и более. Учитывая результаты анализа НДС системы при максимальном угле падения пласта в 6°, который в Западном Донбассе встречается не столь часто, сделан вывод о достаточной обоснованности моделирования выработки с параллельным расположением угольных пластов относительно ее почвы.

Влияние величины подрывки почвы проанализировано в диапазоне 0 – 1,5 м и установлены следующие закономерности. Процесс пучения пород почвы практически в малой степени зависит от величины подрывки, а обусловлен главным образом строением и свойствами близлежащих породных слоев. Эпюры полных перемещений приконтурных пород показывают, что их вектор меняет направление на 180° от преимущественно вертикального в кровле, горизонтального в боках до вертикального в почве с противоположным знаком. То есть, процесс пучения затрагивает значительный объем пород не только в почве, но и в боках выработки и отчасти в непосредственной кровле, а некоторое изменение расположения выработки (связанное с величиной подрывки) относительно угольного пласта не меняет сути явления пучения. Те же причины воздействуют на процесс деформирования стоек рам, особенно их нижней части, поэтому величина подрывки в исследуемом диапазоне не оказывает существенного влияния на НДС рамной крепи.

На первом этапе моделирования замка податливости была предпринята попытка точного отражения его конструкции применительно к крепи КШПУ-15,0. В результате весьма трудоемкого и длительного процесса адаптации программного обеспечения к особенностям реальной конструкции замка, начальным и граничным условиям его моделирования удалось произвести расчет НДС системы «массив – пластовая выработка», но только в упругой постановке до осадки крепи (срабатывания замка податливости), характеризующейся малыми перемещениями контура выработки. Попытка моделирования полных диаграмм деформирования всех элементов системы выявила нестабильность процедуры выполнения расчетов методом МКЭ из-за, как нам представляется, статической неуравновешенности рамы на участке замкового соединения. Анализ данной ситуации выявил, что по причине «точечного» контакта концевых участков профилей стойки и верхняка друг с другом в замке и малой площади этого контакта появляется возможность деформирования (перемещения) рамы на большую величину (по координатам X , Y и Z) при весьма малом приращении нагрузки, что дает сбой в программе и прекращение выполнения расчета НДС. Ситуация еще более усугубляется при моделировании процесса податливости замка, когда при скольжении верхняка относительно стойки из-за существующей геометрии рамы площадь их контакта на участке замка снижается и увеличивается степень свободы перемещения (статическая неуравновешенность) рамы в произвольном направлении. Также следует учесть перспективу развития данной геомеханической модели в плане отражения возможности пластического течения металла, появления областей не только разупрочнения, но и разрыхления в близлежащем породном массиве. Указанные факторы приводят к усложнению геомеханической модели, что объективно усилит нестабильность процедуры выполнения расчетов НДС и неопределенность во времени преодоления данных трудностей моделирования.

В ситуации, когда отсутствует возможность достаточно оперативно смоделировать реальный объект, были внесены обоснованные конструктивные

идеализации, позволяющие стабильно продолжать расчеты НДС системы «массив – пластовая выработка». Однако, упрощения конструкции замка не должны искажать его деформационно-силовую характеристику при работе в режиме податливости. Данное условие, на наш взгляд, позволило вполне адекватно смоделировать работу замка податливости.

Моделирование идеализированной конструкции замка податливости было выполнено в две стадии. *На первой* – в районе расположения замка податливости была введена прокладка из легкодеформирующегося материала, который под воздействием сжимающих усилий в раме обеспечивал ее податливость. При этом была достигнута стабильность процесса расчета НДС системы по полной диаграмме деформирования ее элементов, а анализ эпюр напряжений показал их соответствие классическим положениям механики подземных сооружений: моделирование деформационных швов с легкодеформируемым материалом не вносит существенных искажений в качественную картину нагружения рамной крепи.

Вторая стадия моделирования замка выполнена для достижения адекватности реальному процессу податливости в количественном плане. В этой связи деформационно-силовая характеристика замка представляет собой зависимость реакции его сопротивления P от величины U_y податливости (как правило, в вертикальном направлении по координате Y). Ряд существующих лабораторных испытаний рамной трехзвенной податливой крепи указывает на характер работы замка из спецпрофиля СВП, приближающийся к режиму постоянного сопротивления. Этими же экспериментами установлено, что при правильной сборке замка рамная крепь переходит в режим податливости при сопротивлении $P_{под} = (0,7...0,8)P_{max}$, приближающемся к максимальной несущей способности P_{max} рамы. Описанный режим квазипостоянного сопротивления замка податливости достаточно адекватно можно отразить диаграммой идеальной пластичности материала, располагаемого в раме по координатам установки замков. Параметры материала должны отражать реальную деформационно-силовую характеристику замка для конкретного типового сечения и номера спецпрофиля СВП. Поэтому предел текучести σ_T^3 имитатора замка подобран таковым, чтобы при средних нормальных напряжениях по площади поперечного сечения СВП (посредине длины замка) при нагрузке на раму 80% от ее несущей способности материал модели переходил в состояние идеальной пластичности и обеспечивал податливость крепи.

Имитатор замка в форме поперечного сечения соответствующего номера спецпрофиля СВП расположен по координатам замков рамы реальной длиной 400 мм. Это позволило моделировать раму цельной (от левой опоры до правой) по контуру крепи с двумя вставками из материала имитатора замка, отличающегося от механических характеристик стали Ст.5 только пониженным пределом текучести. Такая идеализация замка податливости обеспечи-

ла стабильность процедуры расчета НДС системы «массив – пластовая выработка» по полной диаграмме деформирования материалов ее элементов.

Одновременно с другими факторами изучалось влияние типа межрамного ограждения (металлическая сетка, деревянная или железобетонная затяжка), которое можно оценить как весьма несущественное (в пределах точности расчетов МКЭ) при развитии процесса пучения почвы и деформирования рамной крепи.

Подытоживая результаты тестирования модели системы «массив – пластовая выработка» можно констатировать факт ее всестороннего обоснования по обеспечению адекватности описания реальным геомеханическим процессом в окрестности пластовых выработок.

ВЫВОДЫ

1. На основе анализа структур угольных пластов сформирован ряд тестовых моделей расчета НДС системы «массив – пластовая выработка», результаты которого установили несущественность влияния породных прослоев (37% случаев сложного строения угольных пластов) на поле напряжений и достаточную адекватность моделирования угольного пласта усредненной мощности ($m^y = 1$ м) – погрешность от такого усреднения (при оценке пучения пород почвы и деформирования стоек крепи) не выходит за рамки допускаемой точности расчетов МКЭ.

2. Тестовые расчеты НДС системы «массив – пластовая выработка» доказали появление нарушений контактов литологических разностей по плоскостям напластований в пределах исследуемых областей массива в окрестности выработки, что нашло отражение в построении геомеханических моделей системы.

3. Обоснованы параметры пластовых подготовительных выработок и их крепи, наиболее адекватно отражающих горнотехнические условия их поддержания. Тестовые расчеты НДС системы доказали несущественность влияния угла наклона пласта относительно почвы выработки и глубины ее подрывки в условиях шахт Западного Донбасса. Поэтому вполне обоснованно принято решение о моделировании параллельности пласта и почвы выработки с усредненной величиной подрывки 1,0 м, что не снижает достоверности расчетов по оценке проявлений горного давления в пластовой выработке. Доказана в качественном и количественном плане адекватность модели замка податливости рамной крепи его реальному режиму работы.

4. Комплекс тестовых расчетов НДС системы «массив – пластовая выработка» позволил отработать геомеханическую модель по всем основным параметрам до уровня ее адекватного отражения геомеханических процессов в окрестности выработки, что обуславливает высокую степень достоверности исследований по прогнозированию проявлений горного давления.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕЙ ТОЛЩИ ПОРОД НА НДС СИСТЕМЫ «МАССИВ – ПЛАСТОВАЯ ВЫРАБОТКА»

В главе 2 обоснована и сформирована база вариантов структуры и свойств близлежащей угле вмещающей толщи пород Западного Донбасса, наиболее адекватно и достоверно отражающих реальные горно-геологические условия. Первичные тестовые расчеты НДС геомеханической системы «массив – пластовая выработка» полностью отработали все ее геометрические, механические и силовые параметры. Однако, полученная многовариантность расчетов потребовала дальнейших исследований в плане выявления и усреднения параметров, несущественно влияющих на общие закономерности развития пучения пород почвы выработки. Эта задача выполнена при проведении второго этапа тестовых расчетов в соответствии с вариантами табл. 2.7 и 2.8.

4.1. ОБОСНОВАНИЕ ВАРИАНТОВ РАСЧЕТА НДС СИСТЕМЫ «МАССИВ – ПЛАСТОВАЯ ВЫРАБОТКА» И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Отработка (путем комплекса тестовых расчетов НДС) геомеханической системы начата с анализа влияния структуры непосредственной и основной кровли угольных пластов. В работах [61, 84], помимо основных закономерностей проявлений горного давления в пластовых выработках шахт Западного Донбасса, был выявлен так называемый «эффект штампа», когда породный слой непосредственной кровли повышенной жесткости и прочности «выдавливает» более слабые породы почвы в полость выработки за счет образования зон повышенного горного давления (ПГД) в ее боках. Это влияние жесткости и прочности непосредственной кровли не является доминирующим в механизме развития пучения, однако по данным [84] величина пучения почвы может колебаться до 19,2% в зависимости от модуля деформации пород непосредственной кровли и до 72,9% в зависимости от величины сопротивления сжатию, что является весьма существенным фактором. Приведенные данные характеризуют максимум влияния, когда в непосредственной кровле залегает песчаник мощностью порядка 4 м, который благодаря своей жесткости и прочности не разрушаясь действует как штамп, выдавливая породы почвы в полость выработки.

С таких позиций проанализированы структуры близлежащих породных слоев кровли угольных пластов шахт Западного Донбасса. Случай залегания в непосредственной кровле мощного песчаника (до 5 м) имеет место на шахте «Юбилейная», однако является исключением из общих закономерностей

стей строения углевмещающей толщи, весьма ограничен в распространении и не является характерным. Это подтверждают исследования [83] структуры в целом по Западному Донбассу, которые оценивают вероятность появления песчаника в непосредственной кровле до 12%, а вероятность залегания мощного песчаника оказывается еще меньше. Таким образом, существует низкая вероятность интенсификации процесса пучения почвы за счет воздействия мощного песчаника в непосредственной кровле. Наиболее вероятна следующая структура пород непосредственной кровли и близлежащих пород основной кровли. В непосредственной кровле преобладает вероятность залегания аргиллита, мощность которого имеет основной диапазон колебаний от 1 до 6 м с преимущественным интервалом 2 – 3 м. Эти данные не противоречат исследованиям [83], где по Западному Донбассу установлена вероятность 52% появления аргиллита мощностью $m_1^K = 1...4$ м (76%). Здесь следует отметить, что аргиллит по своим деформационным и прочностным характеристикам не способен создать жесткую и прочную породную плиту в непосредственной кровле, действующую как штамп на породы почвы. Приведенные факты обосновывают целесообразность «унификации» строения непосредственной кровли, представив ее аргиллитом постоянной мощности $m_1^K = 2$ м, что существенно сократит объем вариантов расчета структур в дальнейшем без потери объективности отражения реальных горно-геологических условий.

Строение основной кровли, с точки зрения влияния на процесс пучения почвы, не представляет интереса, так как по данным [61, 83] существенного воздействия основной кровли не наблюдается. Однако, с целью адекватного представления в целом процесса сдвижения углевмещающей толщи в полость выработки, необходимо обосновать также структуру близлежащих породных слоев основной кровли. На основании результатов второго этапа тестовых расчетов НДС системы представляется целесообразным смоделировать два нижних слоя основной кровли из аргиллита и алевролита мощностью по 4 м. Тогда породы кровли в целом моделируются суммарной мощностью 10 м, которой вполне достаточно [61, 83] для полного отражения возмущений НДС массива, вызванных проведением выработки.

Параметры угольного пласта моделируются на основе ранее выполненного обоснования.

Анализ степени влияния структуры почвы на процесс ее пучения позволил принять следующее решение относительно геомеханической модели системы «массив – пластовая выработка»: первый и четвертый породные слои почвы характеризуются диапазоном изменения мощности $m_{1,4}^I = 0,5...4$ м; второй и третий – $m_{2,3}^I = 1...4$ м.

Таким образом, выявлена наиболее характерная структура близлежащей углевмещающей толщи угольных пластов, которая будет воспроизведена в комплексе вариантов моделей системы «массив – пластовая выработка».

Степень адекватности результатов вычислительного эксперимента напрямую зависит от достоверного отражения механических свойств близлежащей углевмещающей толщи. Прежде всего, объективность исследований зависит от выбранной модели поведения горной породы, которая (как было указано ранее) описывает все стадии ее деформирования: упругопластическую, разупрочнение и разрыхление. Однако, здесь для реального объекта возникает дефицит информации о его механических характеристиках полной диаграммы деформирования. По существу, при геологических изысканиях определяется только сопротивление сжатию того или иного литотипа, остальные характеристики устанавливаются при проведении специальных достаточно трудоемких лабораторных испытаний. Такие исследования были проведены специалистами [69, 70, 91] для всех литотипов слабометаморфизованных пород Западного Донбасса, результаты которых использованы в вычислительном эксперименте. Для этого наиболее характерные диапазоны колебаний механических характеристик конкретных литотипов проанализированы и сведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЛИЗЛЕЖАЩИХ ПОРОДНЫХ СЛОЕВ КРОВЛИ И ПОЧВЫ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Тип породы	$\sigma_{сж}^y$, МПа	$E \cdot 10^4$, МПа	$\sigma_{сж}^o / \sigma_{сж}$	M / E
Аргиллит	6 – 11	0,2 – 0,4	0,20 – 0,25	0,5 – 1
Алевролит	18,2 – 20,6	0,6 – 1,2	0,12 – 0,15	1,5 – 2,5
Аргиллит	13 – 20	0,3 – 0,6	0,15 – 0,20	0,5 – 1
Угольный пласт	30 – 40	0,30 – 0,35	0,10	3
Алевролит	13,8 – 30	0,4 – 1	0,15 – 0,20	1 – 2
Песчаник	40 – 51	1,5 – 2	0,08 – 0,10	3 – 5
Аргиллит	4,9 – 21	0,2 – 0,4	0,20 – 0,25	0,5 – 1
Маломощные угольные пласты и пропластки	30 – 40	0,30 – 0,35	0,10	3
Алевролит	8 – 30	0,8 – 1,5	0,15 – 0,20	1 – 2

Примечание: некоторые литотипы могут отсутствовать или изменяться порядок их расположения по вертикальной координате.

В заключении анализа горно-геологических условий размещения подготовительных выработок принят угол падения пласта $\alpha = 3,5^\circ$, а глубина залегания изменяется в пределах $H = 300 \dots 500$ м. В отношении параметра H также следует принять во внимание, что при используемом пошаговом решении задачи по полной диаграмме деформирования породы глубина меняется плавно до максимума, так что не представляет трудностей фиксирование вычислений при любой величине H и определение НДС системы «массив – пластовая выработка» в пределах и за пределами заданного диапазона из-

менения глубины расположения выработки.

Следующая основная задача – построить алгоритм вычислительного эксперимента по установлению закономерностей пучения почвы в зависимости от ее структуры и свойств. В этой связи обосновываются варианты моделей системы, которые должны охватывать наиболее представительные диапазоны изменения одновременно структуры и свойств только пород почвы пласта, так как структура и свойства пород кровли уже обоснованы в предыдущем подразделе. Установлено, что практически повсеместно залегающий в кровле аргиллит и алевролит не может оказать сколь-нибудь существенного влияния на развитие процесса пучения в плане его интенсификации или, наоборот, ограничения. Поэтому породы кровли пласта моделируются с постоянными параметрами для всех вариантов расчета (см. табл. 4.1):

– первый породный слой кровли – $m_1^K = 2$ м,

$$\sigma_{сж1}^K = 15 \text{ МПа}, E_1^K = 0,4 \cdot 10^4 \text{ МПа}, \frac{(\sigma_{сж1}^K)^p}{\sigma_{сж1}^K} = 0,2, \frac{M_1^K}{E_1^K} = 0,8;$$

– второй породный слой кровли – $m_2^K = 4$ м,

$$\sigma_{сж2}^K = 19 \text{ МПа}, E_2^K = 0,9 \cdot 10^4 \text{ МПа}, \frac{(\sigma_{сж2}^K)^p}{\sigma_{сж2}^K} = 0,15, \frac{M_2^K}{E_2^K} = 2;$$

– третий породный слой кровли – $m_3^K = 4$ м,

$$\sigma_{сж3}^K = 8 \text{ МПа}, E_3^K = 0,3 \cdot 10^4 \text{ МПа}, \frac{(\sigma_{сж3}^K)^p}{\sigma_{сж3}^K} = 0,20, \frac{M_3^K}{E_3^K} = 0,5.$$

Угольный пласт простого строения моделируется мощностью $m^y = 1,0$ м с механическими характеристиками, указанными в табл. 4.1.

Для адекватного отражения структур пород почвы учитываются следующие факторы:

– *во-первых*, ограничено количество вариантов структур пород почвы, на построение и обработку которых задалживается немало времени;

– *во-вторых*, в уже смоделированных структурах введен прием исключения (при необходимости) условия проскальзывания друг относительно друга смежных слоев, тогда при их одинаковых механических характеристиках образуется более мощный породный слой (как сумма двух смежных слоев); таким образом одну базовую структуру можно преобразовать в несколько с минимальными затратами времени;

– *в-третьих*, для одной и той же модели структуры производится расчет

группы вариантов механических характеристик каждого породного слоя, что отражает не только диапазон изменения свойств литотипа, но и вариацию чередования литотипов по глубине почвы угольного пласта (данная операция также не требует существенных затрат времени).

Изложенный методологический прием позволил существенно сократить затраты времени на проведение комплекса вычислительных экспериментов без ущерба надежности и адекватности определения закономерностей развития пучения почвы пластовых выработок. В результате сформировано минимально достаточное количество вариантов моделей системы «массив – пластовая выработка», структура почвы которой отражена в табл. 4.2, а механические характеристики – в табл. 4.3.

Таблица 4.2

РАСЧЕТНЫЕ ВАРИАНТЫ СТРУКТУРЫ БЛИЗЛЕЖАЩИХ ПОРОД ПОЧВЫ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Мощность породных слоев почвы, м	Номера вариантов структуры				
	1	2	3	4	5
Первый, m_1^{II}	2	0,5	4	1	3
Второй, m_2^{II}	2	3	1,5	1	4
Третий, m_3^{II}	2	1,5	3	4	1
Четвертый, m_4^{II}	2	4	0,5	3	1

В табл. 4.2 приведены базовые варианты структуры почвы, которые подобраны таким образом, что, *во-первых*, структура в целом изменяется от равномерной (по мощности слоев) до крайне неравномерных с послойным и групповым чередованием тонких и мощных слоев; *во-вторых*, в каждом породном слое имеется пять вариантов различных значений мощности. Парное и строенное объединение смежных слоев дает еще шесть структур почвы внутри каждой базовой, тогда, при необходимости, можем получить всего 35 структур близлежащих пород почвы пласта, которые в совокупности вполне адекватно отражают горно-геологические условия поддержания подготовительных выработок на шахтах Западного Донбасса

Учитывая расчетные варианты сочетаний механических характеристик близлежащих породных слоев почвы (табл. 4.3) для установления закономерностей развития пучения требуется провести 35 расчетов НДС системы по базовым вариантам структуры и максимум 75 вариантов (при необходимости), производных от базовых структур. Сами закономерности определяются на основе методов корреляционно-дисперсионного анализа [106] эпюр перемещений почвы, которые доставляются каждым отдельным расчетом НДС системы и в совокупности формируют исходную базу данных для построения уравнений регрессии.

Таблица 4.3

РАСЧЕТНЫЕ ВАРИАНТЫ СОЧЕТАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛИЗЛЕЖАЩИХ ПОРОДНЫХ СЛОЕВ ПОЧВЫ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Номер варианта	m_1^{II}				m_2^{II}			
	$\sigma_{\text{сж}}$, МПа	$\frac{\sigma_{\text{сж}}^o}{\sigma_{\text{сж}}}$	$E \cdot 10^4$, МПа	$\frac{M}{E}$	$\sigma_{\text{сж}}$, МПа	$\frac{\sigma_{\text{сж}}^o}{\sigma_{\text{сж}}}$	$E \cdot 10^4$, МПа	$\frac{M}{E}$
1	5	0,25	0,3	0,5	5	0,2	0,4	1
2	5	0,25	0,3	0,5	10	0,15	0,6	2
3	20	0,2	1	1	40	0,1	2	3
4	5	0,25	0,3	0,5	10	0,15	0,6	2
5	20	0,2	1	1	40	0,1	2	3
6	5	0,25	0,3	0,5	40	0,1	2	3
7	20	0,2	1	1,5	20	0,15	1,5	2

Продолжение таблицы 4.3

Номер варианта	m_3^{II}				m_4^{II}			
	$\sigma_{\text{сж}}$, МПа	$\frac{\sigma_{\text{сж}}^o}{\sigma_{\text{сж}}}$	$E \cdot 10^4$, МПа	$\frac{M}{E}$	$\sigma_{\text{сж}}$, МПа	$\frac{\sigma_{\text{сж}}^o}{\sigma_{\text{сж}}}$	$E \cdot 10^4$, МПа	$\frac{M}{E}$
1	20	0,15	1	2	20	0,2	0,6	1,5
2	10	0,2	0,6	1	10	0,15	0,6	2
3	20	0,2	1	1	30	0,1	0,3	3
4	40	0,1	2	3	40	0,1	2	3
5	10	0,2	0,6	1	10	0,15	0,6	2
6	10	0,2	0,6	1	30	0,1	0,3	3
7	5	0,25	0,3	0,5	5	0,2	0,4	1

Исследования проводятся при фиксированном угле падения $\alpha = 3,5^\circ$ угольного пласта и глубине размещения выработки $H = 400$ м; НДС системы при $H \neq 400$ м рассчитывается автоматически при используемой пошаговой технологии вычислений. Таким образом, для учета влияния параметра H не требуется дополнительных расчетов, а построение уравнений регрессии, в том числе и по параметру H , осуществляется теми же методами корреляционно-дисперсионного анализа.

В методическом плане сформирован следующий алгоритм исследований:

- расчет НДС базовых моделей системы «массив – пластовая выработка» из табл. 4.2;
- анализ эпюр напряжений и перемещений почвы выработки по вариантам распределения механических характеристик из табл. 4.3;
- построение в первом приближении закономерностей связи перемещений почвы с геомеханическими параметрами системы;
- установление горно-геологических условий неоднородного трактова-

ния закономерностей проявления пучения почвы;

– проведение дополнительных расчетов по другим вариантам структуры почвы, являющихся производными от базовых;

– уточнение закономерностей влияния структуры и свойств пород почвы на процесс ее пучения;

– построение уравнений регрессии для прогноза пучения почвы подготовительных выработок.

4.2. АНАЛИЗ НДС ПОРОД ПОЧВЫ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ

В соответствии с выработанным алгоритмом проведения исследований на первом этапе был произведен расчет базовых моделей по пяти структурам почвы (см. табл. 4.2) при семи вариантах распределения по породным слоям их механических характеристик (см. табл. 4.3). Предварительный анализ показал (при фиксированной глубине расположения выработки) некоторую неоднозначность влияния на процесс пучения структуры и свойств близлежащих пород почвы: с одной стороны, подтверждается общеизвестная тенденция снижения перемещений почвы при увеличении прочностных характеристик породы; с другой стороны, на процесс накладывается воздействие значительной неоднородности свойств (в ряде горно-геологических условий) смежных породных слоев (например, увлажненный алевролит и песчаник), которое усиливается при большом диапазоне колебаний их мощности и возможности разрушения тонкого песчаника. Такая ситуация требует детального анализа эпюр компонент напряжений и на его основе раскрытия особенностей механизма перемещения пород почвы в зависимости от ее структуры и свойств.

4.2.1. АНАЛИЗ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ НАПРЯЖЕНИЙ

Анализ НДС пород почвы пластовой выработки выполнен начиная с эпюры вертикальных напряжений σ_y при одинаковых мощностях слоев (вариант №1 структуры почвы по табл. 4.2). Вне зависимости от механических характеристик породных слоев почвы эпюра σ_y имеет общую черту (рис. 4.1): область пониженных сжимающих σ_y , переходящих в растягивающие (ближе к поверхности почвы выработки), значительно превышает таковую в кровле, что весьма характерно для условий Западного Донбасса, где проявления пучения, как правило, более интенсивны, чем проявления горного давления в кровле выработки.

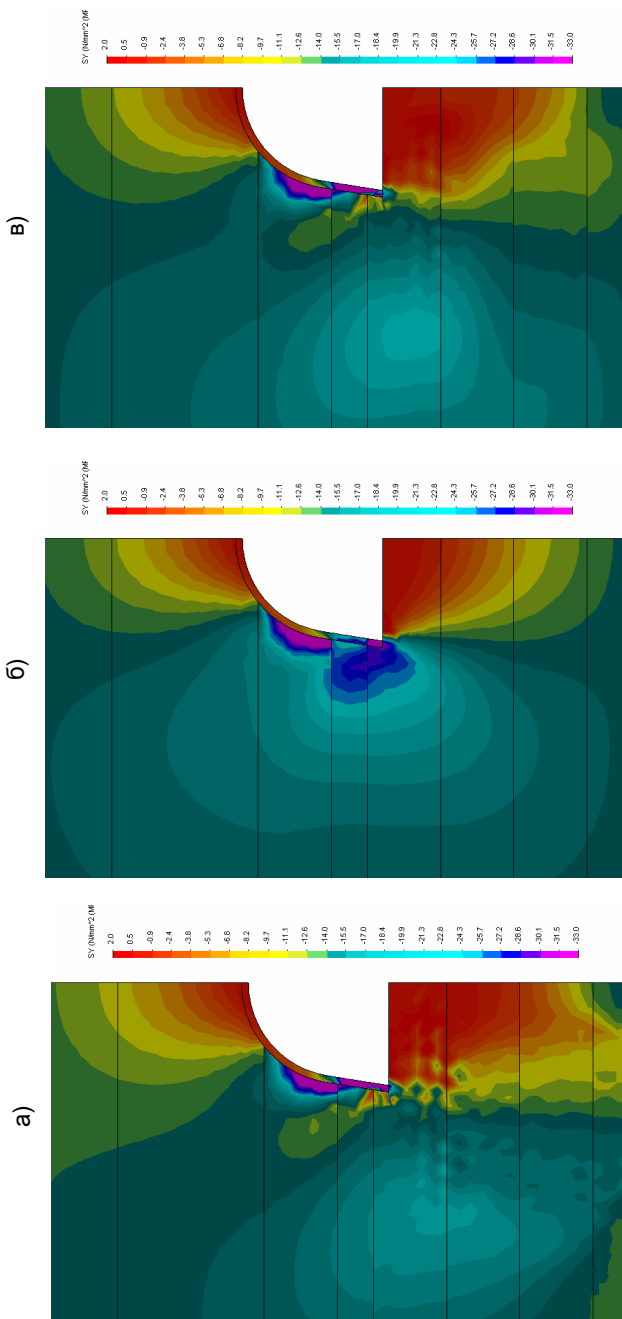


Рис. 4.1. Эпюры вертикальных напряжений σ_y при варианте №1 структуры почвы (из табл. 4.2) и вариантах распределения механических характеристик из табл. 4.3): а) №2; б) №3; в) №6

Растягивающие σ_y формируют область разупрочнения в почве (так как породы Западного Донбасса практически не сопротивляются растягивающим усилиям с учетом разупрочняющих факторов увлажнения, слоистости, трещиноватости и реологии), глубина которой в вариантах №2 и №6 (см. рис. 4.1, а, в) залегания весьма слабых пород в непосредственной почве достигает границ третьего слоя, то есть составляет порядка 4 м. Здесь особенностью является то, что в варианте №6 второй породный слой представлен более крепким песчаником, но этот фактор мало способствует ограничению глубины зоны разупрочнения. Очевидно, здесь проявляется воздействие других компонент напряжений и в некоторой степени – значительная неоднородность механических свойств смежных слоев пород. В варианте №3 (см. рис. 4.1, б) более крепкие породы ограничивают глубину области разупрочнения до 2,5 м, что вполне укладывается в рамки существующих представлений о проявлениях пучения почвы, хотя эта тенденция не так ярко проявляется: для уменьшения глубины разупрочнения до 40% требуется повышение величины сопротивления сжатию в четыре раза. С другой стороны, если допустить некоторое небольшое сопротивление песчаника растягивающим усилиям, то в пределах его мощности возможно исключение разупрочнения от растягивающих σ_y и эта область ограничится только первым породным слоем почвы.

Среди других вариантов соотношений механических характеристик следует отметить, что залегание более слабых пород в третьем и четвертом слое по сравнению с более крепкими породами первого и второго слоев практически не изменяет эпюру σ_y (как в качественном, так и количественном плане), хотя часть более слабых отдаленных пород находится в предельном состоянии. Очевидно, первые более крепкие слои сдерживают развитие процесса пучения. В противоположном варианте №4 залегание более крепких пород в третьем и четвертом слоях также несущественно влияет на эпюру σ_y в сравнении с вариантом №2 (см. табл. 4.3) залегания в почве только слабых пород. Таким образом, для структуры №1 пород почвы неоднозначность влияния механических характеристик ее слоев на эпюру σ_y проявляется в том, что, с одной стороны, свойства отдаленных слоев несущественно влияют на эпюру σ_y ; с другой, – приближение песчаника к непосредственной почве также не ограничивает глубину зоны разупрочнения наряду с тем, что залегание более крепких пород в первом и втором слоях существенно ограничивает глубину зоны разупрочнения.

Следующий вариант №2 (см. табл. 4.2) структуры почвы характеризуется чередованием менее мощных (нечетные) и более мощных (четные) породных слоев и анализируемый вариант существенным образом отличается от предыдущего, что позволяет (при прочих равных условиях) оценить влияние структуры пород почвы. В слабых породах почвы (для всех четырех слоев – вариант №2 из табл. 4.3) глубина действия растягивающих напряжений σ_y уменьшается (в сравнении с предыдущей структурой) и составляет около

3,2 м (рис. 4.2, а), что соответствует глубине зоны разупрочнения почвы. Когда второй слой представлен песчаником повышенной мощности $m_2^{\text{II}} = 3$ м (вариант №6 из табл. 4.3) происходит уменьшение глубины зоны разупрочнения до 2 м (см. рис. 4.2, в). Следовательно, увеличенная жесткость и прочность второго слоя повышают устойчивость почвы, что обуславливается также уменьшением мощности первого (слабого) породного слоя в сравнении с предыдущей структурой, где влияние песчаника практически отсутствовало. Такая тенденция вполне закономерна и подтверждается эпюрой σ_y для варианта №3 из табл. 4.3 (см. рис. 4.2, б), когда при том же песчанике во втором слое, первый представлен более крепким алевролитом; но из-за его небольшой мощности, влияние оказывается незначительным. Таким образом, общая тенденция влияния крепости пород сохраняется, но увеличивается ее интенсивность до 60%, что может быть, объяснено увеличенной мощностью до 3 м второго породного слоя, когда он представлен песчаником; другие сочетания механических характеристик лишь подтверждают выявленную закономерность.

Третья анализируемая структура (вариант №3 из табл. 4.2) пород почвы (рис. 4.3) характеризуется чередованием слоев пониженной (четные) и повышенной (нечетные) мощности, но в обратном порядке по сравнению с предыдущей структурой. Здесь в плане колебаний глубины зоны разупрочнения обращают внимание следующие особенности:

- при слабых породах во всех слоях (см. рис. 4.3, а – вариант №2 из табл. 4.3) глубина разупрочнения достигает 4,9 м, что превышает таковую для предыдущих структур;

- еще более увеличивается глубина разупрочнения для варианта №6 из табл. 4.3 (см. рис. 4.3, в), которая распространяется до 5,6 м;

- в более прочных породных слоях по варианту №3 из табл. 4.3 (см. рис. 4.3, б) глубина разупрочнения снижается до 2,5 м, что соответствует структуре №1, но превышает глубину разупрочнения для структуры №2.

Такой результат объясняется действием следующих факторов:

- *во-первых*, очевидно, что в слабых породах первого слоя с ростом его мощности увеличивается объем разупрочненных пород, которые нагружают нижележащие слои и глубина разупрочнения в целом увеличивается;

- при повышенной мощности слабого первого породного слоя и залегании во втором слое песчаника пониженной мощности на него формируется значительная нагрузка, а несущая способность оказывается недостаточной и он частично разупрочняется, передавая часть нагрузки на третий более слабый породный слой;

- повышенная жесткость песчаника во втором слое (пониженной мощности) в меньшей степени компенсирует деформирование первого слабого слоя и частично деформация передается на третий слой, что вызывает некоторый рост глубины разупрочнения в варианте №6 по сравнению с вариантом №2 (см. табл. 3.3);

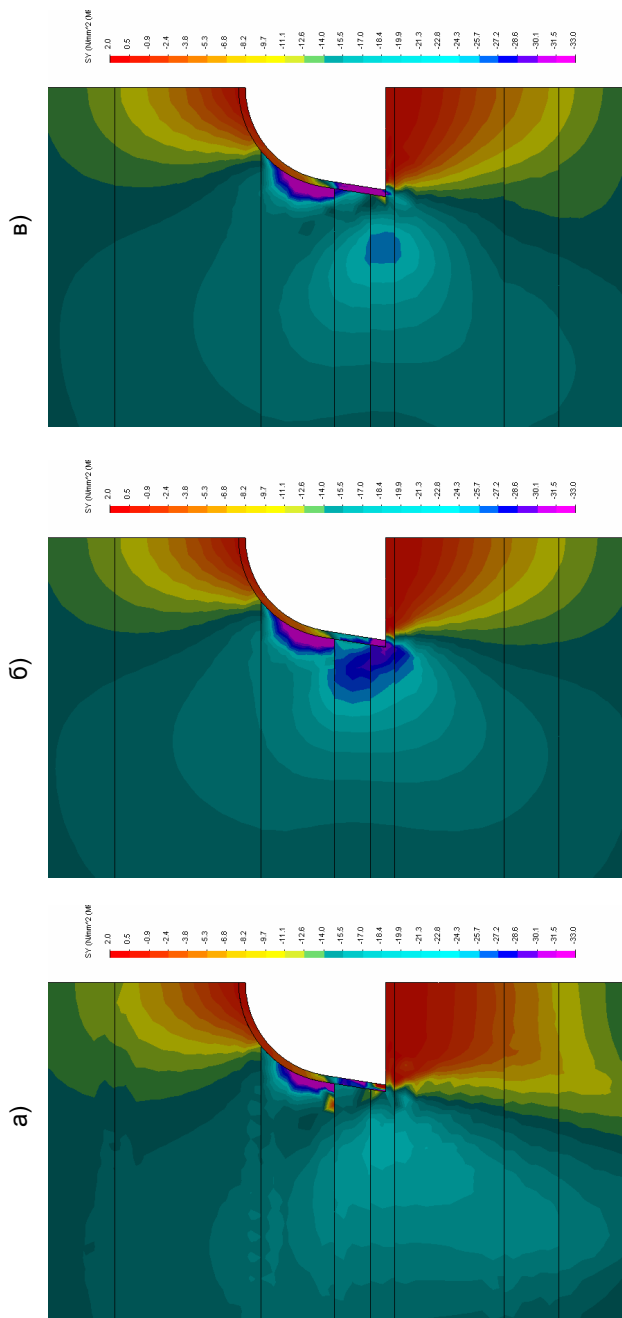


Рис. 4.2. Эпюры вертикальных напряжений σ_v при варианте №2 структуры почвы (из табл. 4.2) и вариантах распределения механических характеристик из табл. 4.3): а) №2; б) №3; в) №6

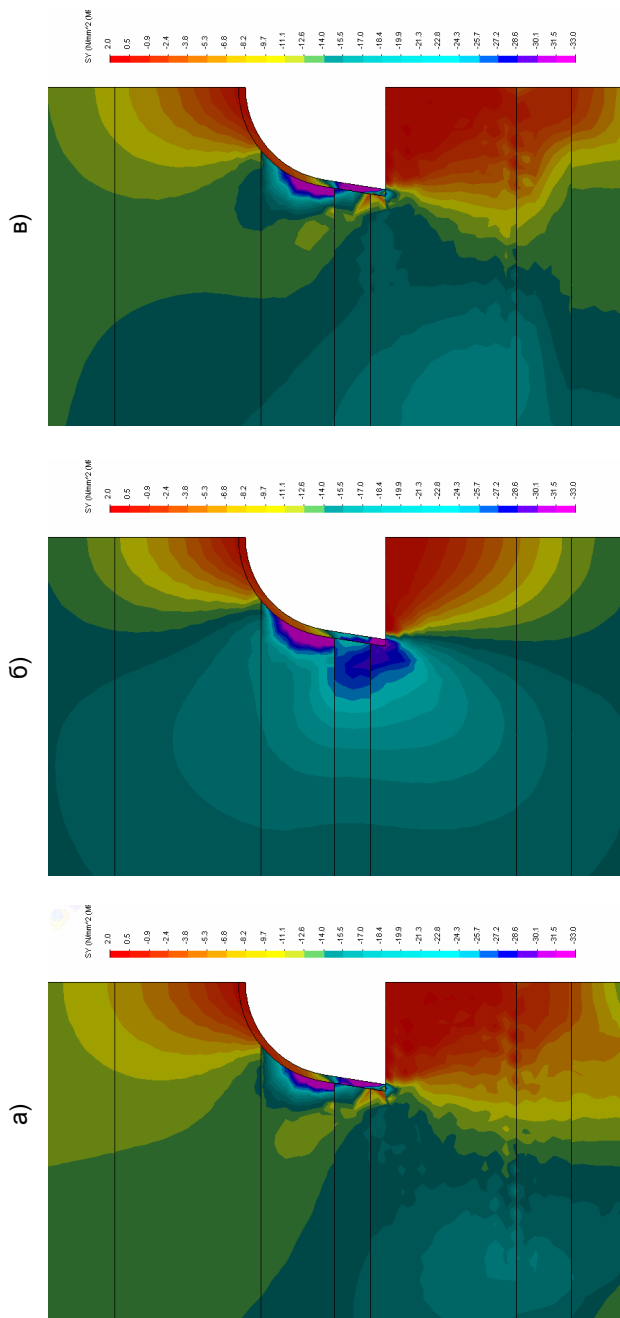


Рис. 4.3. Эпюры вертикальных напряжений σ_v при варианте №3 структуры почвы (из табл. 4.2) и вариантах распределения механических характеристик из табл. 4.3): а) №2; б) №3; в) №6

– при повышенной крепости пород в варианте №3 первый породный слой из алевролита имеет все же меньшую крепость в сравнении с песчаником, поэтому увеличенная мощность алевролита способствует некоторому увеличению глубины разупрочнения.

Таким образом, установлено, что на поле вертикальных напряжений σ_y влияют не только механические характеристики, но и структура пород почвы пластовой выработки.

4.2.2. АНАЛИЗ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ НАПРЯЖЕНИЙ

Анализ эпюр распределения горизонтальных напряжений σ_x в близлежащих породных слоях почвы пластовой выработки выполнен начиная со структуры №1 (см. табл. 4.2), где все четыре породных слоя имеют одинаковую мощность по 2 м (рис. 4.4). При залегании слабых пород во всех слоях (см. рис. 4.4, а – вариант №2 из табл. 4.3) наблюдается относительно однородное поле σ_x в почве, хотя именно горизонтальные напряжения, наиболее ярко отражающие изгиб слоев, подвержены значительным перепадам σ_x (от положительного значения до отрицательного) в пределах каждого из слоев и всей толщи в целом. Очевидно, пониженный градиент изменения σ_x обусловлен образованием значительных по размерам зон предельного и запредельного состояния, когда пластические деформации сглаживают концентрации напряжений от предшествовавшего упругого состояния. Этот вывод подтверждает практически повсеместное действие сжимающих напряжений во всех породных слоях за исключением весьма ограниченных областей с растягивающими σ_x . Сжимающие горизонтальные напряжения во всех четырех слоях превышают, как правило, сопротивление пород сжатию и провоцируют процесс их разупрочнения, что, в свою очередь, интенсифицирует пучение почвы выработки (как это будет показано в дальнейшем).

Диаметрально противоположная картина наблюдается в варианте №3 залегания в почве пород повышенной крепости (см. рис. 4.4, б), где проявляются следующие особенности распределения горизонтальных напряжений. До некоторой степени поле σ_x стабильно без значительных возмущений по причине залегания относительно однородных породных слоев в почве; однако все же проявляются напряжения изгиба, особенно в песчанике (как более прочном и жестком литотипе), где повышенные сжимающие σ_x в нижней части слоя уменьшаются вплоть до нуля в верхней части слоя, что более ярко выражено в районе вертикальной оси выработки. В первом породном слое, где влияние выработки наиболее сильно, в его верхней части развиваются растягивающие σ_x , однако глубина этой области невелика – до 1,2 м. За исключением ограниченной области растягивающих σ_x в остальном объеме

пород (по всем слоям почвы) величина сжимающих σ_x меньше сопротивления сжатию породы почвы, находятся в допредельном состоянии и их пучение невелико.

Представляет интерес промежуточный вариант №6 (см. рис. 4.4, в), когда ниже первого слабого слоя в почве залегает песчаник: здесь совмещены особенности распределения σ_x предыдущих вариантов соотношения механических породных слоев в почве пластовой выработки. В первом слое (малой крепости) градиент изменения σ_x по его мощности относительно невелик, а величина сжимающих σ_x , как правило, превышает сопротивление пород сжатию, и подавляющий объем породы находится в предельном и запредельном состояниях. Нижележащий песчаник обладает существенно повышенной прочностью и жесткостью, поэтому, согласно классическим представлениям, он воспринимает повышенную нагрузку со стороны деформирующихся более слабых пород почвы. Это четко проявляется на эпюрах σ_x , где интенсивный изгиб слоя песчаника генерирует значительные концентрации напряжений σ_x с перепадом в пределах мощности слоя от -20 МПа до +20 МПа. На эпюре σ_x прослеживается изгиб песчаника в полость выработки (в основном по ее ширине), а за ее пределами (в боках), ось изгиба меняет знак кривизны и растягивающие σ_x возникают в нижней части песчаника, а сжимающие σ_x – в его верхней части. Если величина сжимающих σ_x гораздо меньше сопротивления породы сжатию, то растягивающие σ_x значительно превышают сопротивление песчаника растяжению и в области их действия происходит разупрочнение песчаника, следовательно, несмотря на его повышенную крепость, он все же подвержен частичному разрушению. Очевидно, этот процесс провоцирует не только слабый первый породный слой, но и слабый третий слой почвы, залегающий ниже песчаника. В нем поле σ_x еще более однородное, а их величина либо соответствует, либо превышает сопротивление породы сжатию. Значит, частично предельное состояние третьего слоя также формирует повышенную нагрузку на песчаник, что приводит к его локальному разупрочнению. Очевидно, при таких условиях пучение почвы будет умеренно проявляться, что обусловлено, с одной стороны, предельным (запредельным) состоянием слабых пород первого и третьего слоев и частично целостным состоянием песчаника, с другой, ограничивающего в некоторой степени перемещения пород в полость выработки. Аналогичная качественная картина наблюдается и для варианта №4 (см. табл. 4.3), когда первые два слабых слоя находятся в частично предельном и запредельном состояниях, а третий слой из песчаника локально разупрочнен от действия растягивающих напряжений σ_x в его верхней части.

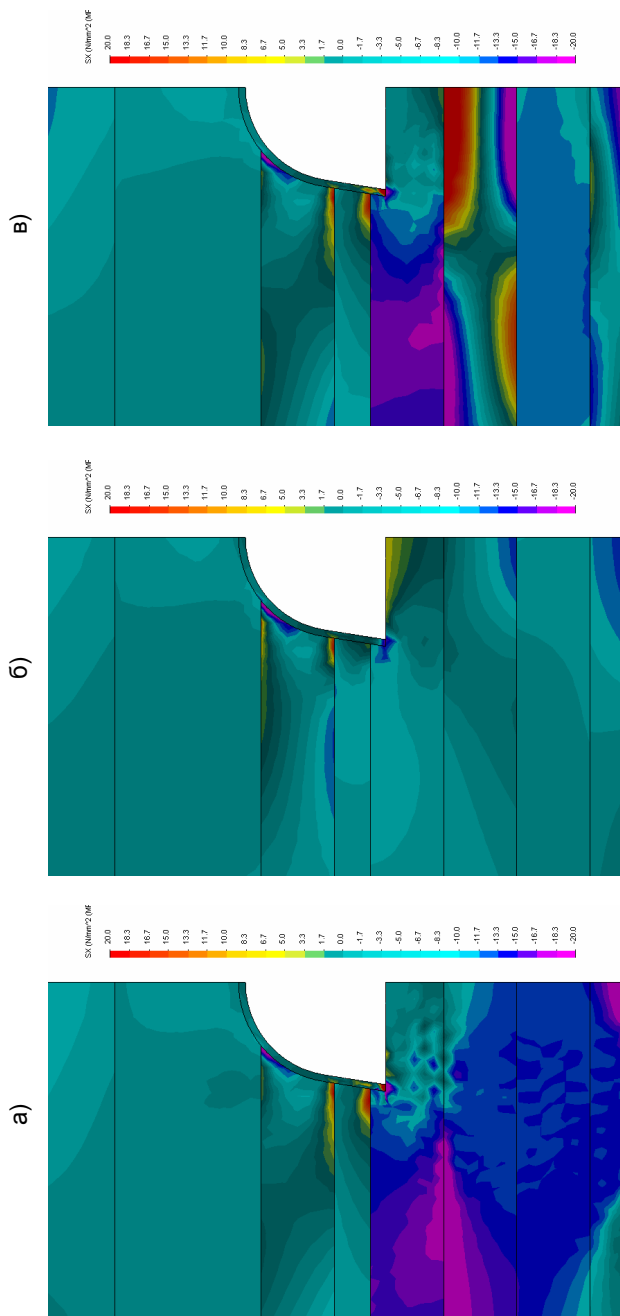


Рис. 4.4. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x при варианте №1 структуры почвы (из табл. 4.2) и вариантах распределения механических характеристик из табл. 4.3): а) №2; б) №3; в) №6

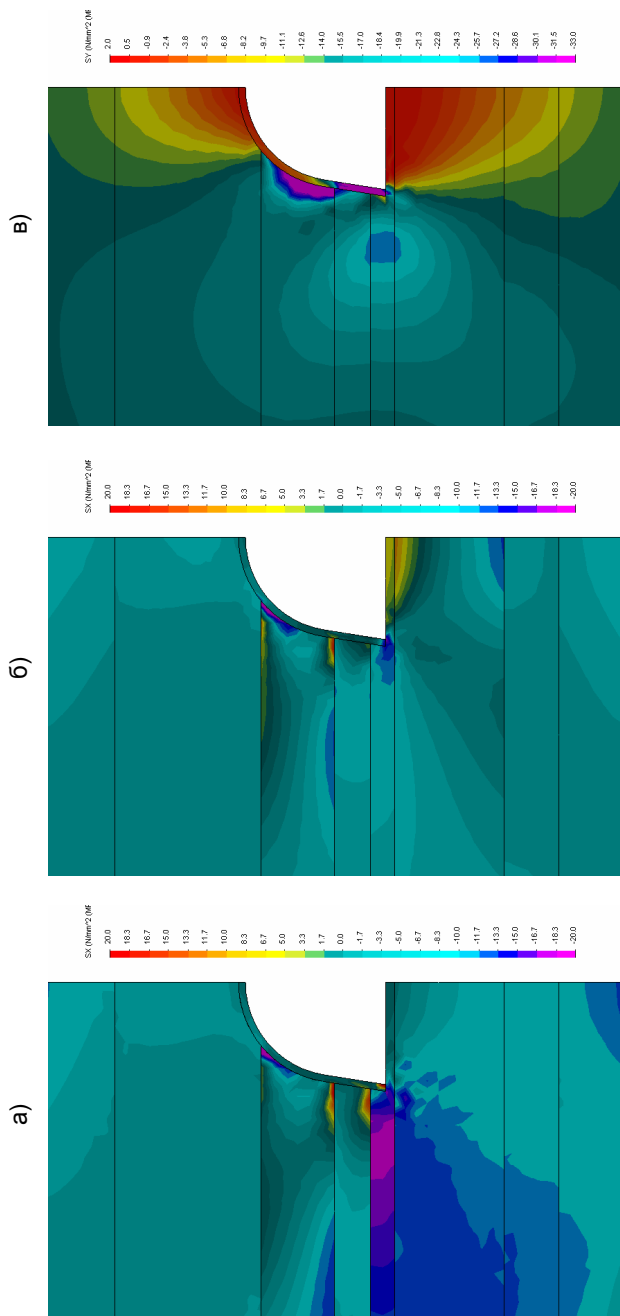


Рис. 4.5. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x при варианте №2 структуры почвы (из табл. 4.2) и вариантах распределения механических характеристик из табл. 4.3): а) №2; б) №3; в) №6

В структуре №2 (см. табл. 4.2), характеризующейся чередованием мало-мощных (нечетных) и мощных (четных) слоев в почве, наблюдаются отчасти схожие тенденции с предыдущей структурой в плане влияния сопротивления сжатию отдельных породных слоев и их расположения относительно почвы выработки (рис. 4.5). Однако, имеются и некоторые особенности, связанные с изменением мощности породных слоев, слагающих близлежащую почву. Так, в варианте №2 (см. табл. 4.3) залегания слабых пород по всей исследуемой толще (см. рис. 4.5, а) имеет место достаточно равномерное распределение сжимающих напряжений $\sigma_x = 10...16$ МПа во всей области за исключением ограниченных зон, примыкающих непосредственно к поверхности почвы выработки – здесь порода более разгружена и эпюра σ_x характеризует изгиб второго породного слоя в полость выработки. Сжимающие σ_x повышенной величины (по отношению к начальному негидростатическому состоянию) указывают на переход части пород в предельное и за-предельное состояние; однако и величина σ_x и размеры этих зон меньше, чем в предыдущей структуре, что обусловлено малой мощностью самого слабого первого слоя. В целом, даже при залегании слабых пород, они оказываются более устойчивыми в связи с уменьшением мощности первого породного слоя.

При распределении механических характеристик по варианту №3 (см. табл. 4.3) залегания пород повышенной крепости обеспечивается их устойчивое состояние на всю исследуемую глубину почвы за исключением приконтурной к выработке части первого и второго породных слоев на глубину до 1 м (см. рис. 4.5, б), где действуют растягивающие σ_x . Здесь влияние структуры проявляется в двух позициях: во-первых, в верхней части второго слоя, представленного песчаником, увеличиваются растягивающие σ_x ; во-вторых, в песчанике второго и четвертого слоев снижаются сжимающие напряжения σ_x в их нижней части. Однако, эти особенности не являются существенными для поля горизонтальных напряжений σ_x и их влияния на устойчивость почвы.

Более значительные изменения эпюры σ_x наблюдаются в варианте №6 (см. табл. 4.3) залегания во втором слое песчаника повышенной мощности (3 м) при слабой маломощной непосредственной почве (0,5 м). Снижение мощности первого породного слоя коренным образом изменяет эпюру σ_x во всех нижележащих породных слоях (см. рис. 4.5, в):

– напряжения σ_x от прогиба песчаника снижаются, а за пределами ширины выработки наблюдается более однородное поле σ_x , что уменьшает область разупрочнения песчаника от растягивающих σ_x и повышает его устойчивость; это обусловлено резким сокращением мощности слабого первого породного слоя (находящегося в запредельном состоянии) и, соответственно, нагружения песчаника;

– третий породный слой из слабого аргиллита имеет, тем не менее, практически равномерное распределение σ_x и характеризуется допредельным состоянием, что обусловлено увеличенной мощностью вышележащего песчаника, в определенной степени защищающего от чрезмерных нагрузок;

– по той же причине в более разгруженном состоянии находится и четвертый породный слой.

Таким образом, за исключением слабой и маломощной непосредственной почвы, а также локальной зоны разупрочненной верхней части песчаника, остальной объем пород почвы находится в устойчивом состоянии, что предопределяет резкое ограничение проявления пучения в пластовой выработке. Остальные варианты распределения механических характеристик по породным слоям почвы (см. табл. 4.3) подтверждают позитивную тенденцию повышения устойчивости почвы при уменьшении мощности слабой непосредственной и залегании песчаника в основной почве.

Следующая структура пород почвы по варианту №3 (см. табл. 4.2), когда маломощные четные слои чередуются с мощными нечетными, еще больше расширяет и раскрывает наметившиеся тенденции влияния на поле распределения горизонтальных напряжений σ_x (рис. 4.6) и процесс развития пучения в целом.

В варианте №2 (см. табл. 4.3) распределения механических свойств по породным слоям почвы их малая крепость обуславливает практически повсеместно предельное и запредельное состояние (см. рис. 4.6, а) на всю исследуемую глубину, однако уровень действующих σ_x оказался несколько ниже, чем в структуре №1, что объясняется увеличением жесткости первого слоя за счет увеличения его мощности (от 2 до 4 м). В то же время, по отношению к структуре №2 величина σ_x завышена, что обусловлено повышенной мощностью самых слабых пород непосредственной почвы и пониженной мощностью второго породного слоя, крепость которого выше в 2 раза по отношению к первому слою.

При повышенной крепости пород во всех слоях почвы (вариант №3 по табл. 4.3) их состояние устойчивое (см. рис. 4.6, б) при достаточно однородном поле напряжений σ_x и мало отличается в качественном и количественном плане от предыдущих структур.

Вариант №6 залегания во втором слое песчаника при слабой непосредственной почве имеет как общие черты, так и некоторые особенности, связанные со структурой – мощная и слабая непосредственная почва и пониженной мощности (1,5 м) песчаник. Непосредственная почва на всю мощность (4 м) находится в предельном и запредельном состояниях, что интенсифицирует процесс перемещения пород в полость выработки, с одной стороны, и, с другой, – увеличивает нагрузку на песчаник второго слоя. Менее мощный (чем в предыдущих структурах) песчаник подвержен интенсивному изгибу и в нем наблюдается высокий градиент изменения напряжений σ_x .

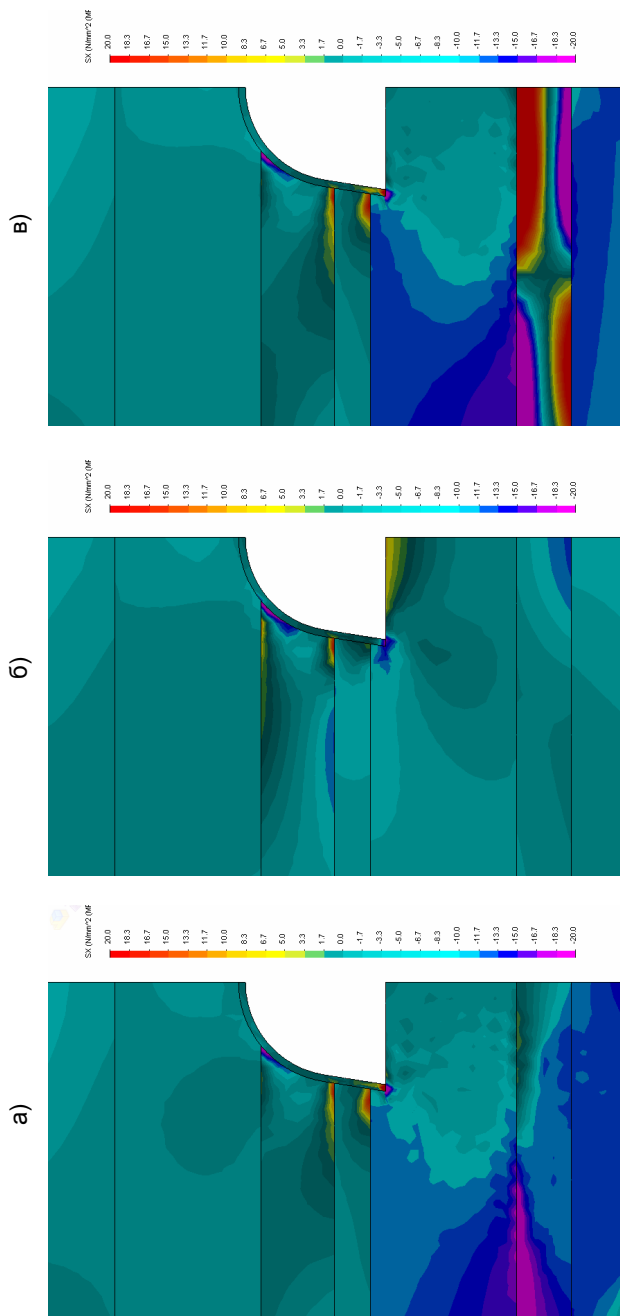


Рис. 4.6. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x при варианте №3 структуры почвы (из табл. 4.2) и вариантах распределения механических характеристик из табл. 4.3): а) №2; б) №3; в) №6

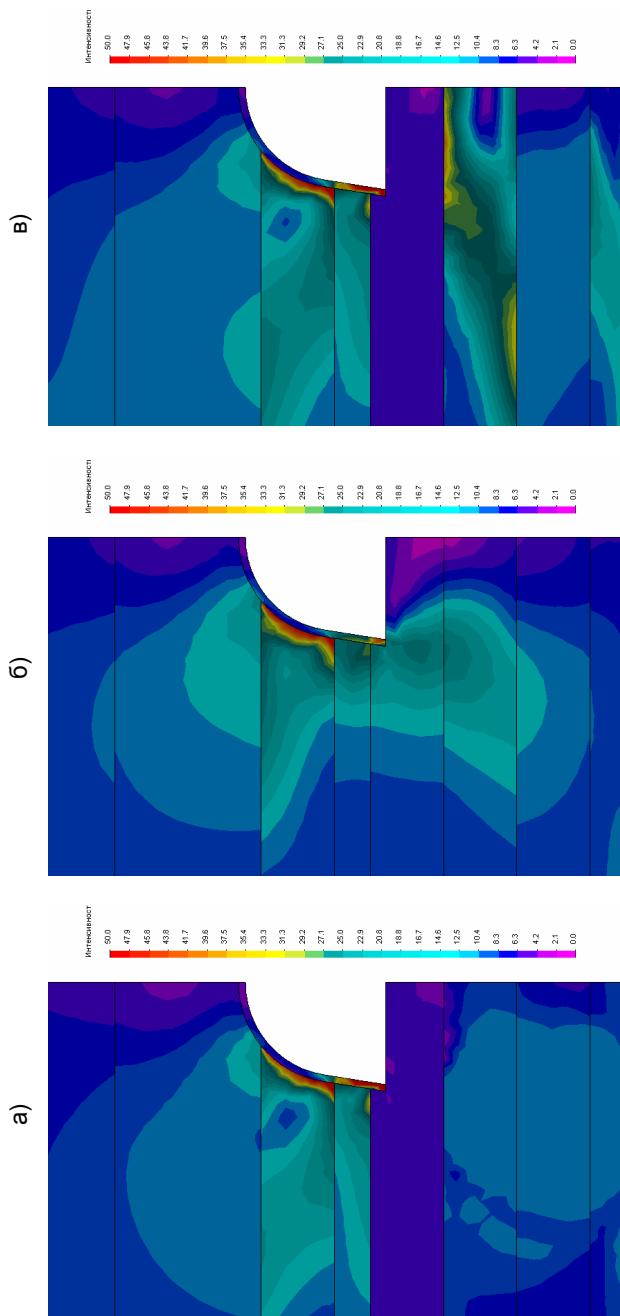


Рис. 4.7. Эпюры приведенных напряжений σ при варианте №1 структуры почвы (из табл. 4.2) и вариантах распределения механических характеристик из табл. 4.3): а) №2; б) №3; в) №6

Область растяжения развивается как под выработкой, так и в боковых частях слоя почти до половины его мощности, что генерирует развитие обширных областей разупрочнения песчаника. Поэтому второй слой не в состоянии воспринять на себя всю нагрузку и передает ее часть на третий более слабый слой, который переходит в предельное состояние: здесь прослеживается в определенной степени аналогия со структурой №1 и возникают существенные отличия по отношению к структуре №3. В целом, предельное (запредельное) состояние слабых и мощных первого и третьего породных слоев должны усиливать пучение почвы, так же, как и частичное разупрочнение песчаника во втором слое; тем не менее, песчаник оказывает некоторое сопротивление развитию пучения, что будет проанализировано позже.

В итоге, анализ эпюры σ_x выявил ряд особенностей формирования НДС пород почвы, который необходимо учитывать при прогнозировании ее пучения в пластовых выработках.

4.2.3. АНАЛИЗ ПРИВЕДЕННЫХ КОМПОНЕНТ НАПРЯЖЕНИЙ

Заключительную часть анализа НДС слоистой почвы пластовой выработки целесообразно посвятить исследованию поля распределения приведенных напряжений σ , величина которых (по теории прочности Кулона – Мора) позволяет оценивать состояние породы от суммарного действия компонент напряжений в области сжимающих усилий. По аналогии с предыдущими исследованиями анализ эпюр σ выполнен начиная со структуры №1 (см. табл. 4.2) залегания в почве породных слоев одинаковой мощности (рис. 4.7).

В варианте №2 (см. табл. 4.3) залегают исключительно слабые породы по всей исследуемой глубине почвы (см. рис. 4.7, а). Самый слабый первый слой характеризуется весьма однородным полем распределения $\sigma = 4,2...6,3$ МПа, который лишь в локальных зонах соответствует допредельному состоянию, а основной объем пород находится в предельном и запредельном состояниях. Второй, третий и четвертый слои характеризуются примерно равноценной эпюрой σ : в районе вертикальной оси выработки размещается зона относительной разгрузки, где величина приведенных напряжений либо ниже, либо соответствует сопротивлению пород сжатию; при движении по оси X в боковые части почвы во всех слоях наблюдается предельное и запредельное состояния. Такая горно-геологическая ситуация преимущественного разупрочнения всех четырех породных слоев почвы приводит к интенсификации проявления пучения.

В варианте №3 (см. табл. 4.3) залегания более крепких пород во всех слоях эпюра σ существенно преобразовывается (рис. 4.7, б):

– увеличивается зона разгрузки, как по размерам, так и по снижению σ , которая затрагивает все породные слои;

– в пределах ширины выработки величина действующих σ в несколько раз меньше сопротивления породы сжатию, что указывает на ее устойчивое состояние;

– в боках (за пределами ширины выработки) только в первом породном слое под опорами стоек крепи образуются локальные области предельного состояния.

Таким образом, в варианте №3 можно состояние почвы характеризовать как устойчивое, которое предопределяет незначительные проявления пучения в пластовой выработке.

Вариант №6 (см. табл. 4.3) чередования слабых и более крепких породных слоев почвы имеет свои отличительные особенности (см. рис. 4.7, в) от вышеописанных эпюр σ :

– слабый первый породный слой практически по всему объему находится в предельном и запредельном состояниях и его эпюра σ тождественна таковой для варианта №2, следовательно, механические характеристики второго слоя (более крепкого) не оказывают влияния на состояние вышележащего слоя;

– эпюра σ для третьего (также слабого) слоя преимущественно аналогична эпюре σ для варианта №2 и его близкое к предельному или предельное состояние не зависит от вышележающего песчаника; эти результаты вполне согласуются с данными [2, 3], утверждающими, что существует высокая степень независимости состояния рассматриваемой литологической разности от состояния смежного породного слоя;

– подтверждение вышесказанному – преимущественно допредельное состояние второго и исключительно устойчивое состояние четвертого слоев; во втором слое локальные области предельного состояния песчаника наблюдаются только на его поверхностях и имеют весьма ограниченные области распространения.

В целом, можно сделать вывод, что пучение, обусловленное разупрочнением слабого первого и третьего слоев, в значительной мере ограничивается более крепким (в основном целостным) песчаником и проявляется в выработке достаточно умеренно.

В структуре №2 (см. табл. 4.2) нечетные слои имеют пониженную, а четные – повышенную мощность (по сравнению со структурой №1) и представляет интерес, насколько это изменение повлияло на поле приведенных напряжений в почве (рис. 4.8).

Вариант №2 (см. табл. 4.3) залегания исключительно слабых пород во всех четырех слоях имеет эпюру σ (см. рис. 4.8, а), весьма схожую с предыдущей структурой за некоторыми исключениями. Так, тонкий первый породный слой из аргиллита разгружен по всей ширине выработки, а разупрочнение наступает только за ее пределами в боках. В остальных породных слоях качественная картина поля σ похожа на предыдущую структуру, но зона допредельного состояния (или близкого к предельному) расширяется почти до размеров ширины выработки, а разупрочнение породы также

происходит только в боковых областях и объемы разупрочненных пород снижаются. Очевидно, такие особенности способствуют уменьшению перемещений пород почвы в полость выработки и достаточно закономерны: мощность наиболее слабого породного слоя мала и, следовательно, меньше объем разупрочняющихся пород, а второй (более крепкий) породный слой, благодаря своей увеличенной мощности, выполняет функции ограничителя пучения. Таким образом, несмотря на слабую почву в целом, мощность наименее крепкого первого породного слоя оказывает определенное влияние на эпюру приведенных напряжений.

Вариант №3 залегания в почве пород повышенной крепости (см. рис. 4.8, б) преобразовывает эпюру σ практически до упругого вида, где весьма ограниченные пластические области располагаются только под опорами стоек; сама эпюра σ несущественно отличается от таковой для предыдущей структуры. Следовательно, в условиях залегания более крепкого алевролита наряду с песчаником мощность, как первого, так и нижележащих породных слоев не оказывает заметного влияния на распределение приведенных напряжений.

Сделанный вывод не применим к варианту №6 чередования слабых (нечетных) слоев с песчаником (см. рис. 4.8, в). В первом и третьем слабых слоях эпюра σ схожа с предыдущей структурой и вариантами, где залегают слабые слои; разница лишь в размерах областей допредельного и предельного состояний. Напротив, второй породный слой (песчаник) благодаря увеличенной мощности полностью исключает зоны предельного состояния в нем самом, но и ограничивает такие в третьем (слабом) породном слое. Этот фактор способствует резкому повышению устойчивости почвы и несущественным проявлениям пучения в выработке.

Структура №3 (см. табл. 4.2) характеризуется пониженной мощностью четных слоев и повышенной мощностью нечетных; она, являясь прямой противоположностью предыдущей структуры, позволит расширить представления о закономерностях влияния на эпюру σ мощностей пород близлежащей почвы при различных вариантах распределения их механических характеристик (рис. 4.9).

В варианте №2 залегания только слабых пород (см. рис. 4.9, а) первый породный слой по всему объему находится в запредельном состоянии, что в совокупности с его увеличенной мощностью (4 м) обуславливает интенсивное развитие пучения. Зона относительной разгрузки в нижележащих слоях примерно соответствует структуре №1, а в боковых областях (по отношению к вертикальной оси выработки) зона предельного состояния несколько увеличена, что также усиливает проявления пучения.

В варианте №3 залегания повсеместно пород повышенной крепости (см. рис. 4.9, б) структура почвы не оказывает существенного влияния на эпюру σ за исключением увеличенных размеров зоны разгрузки в непосредственной почве по ширине выработки.

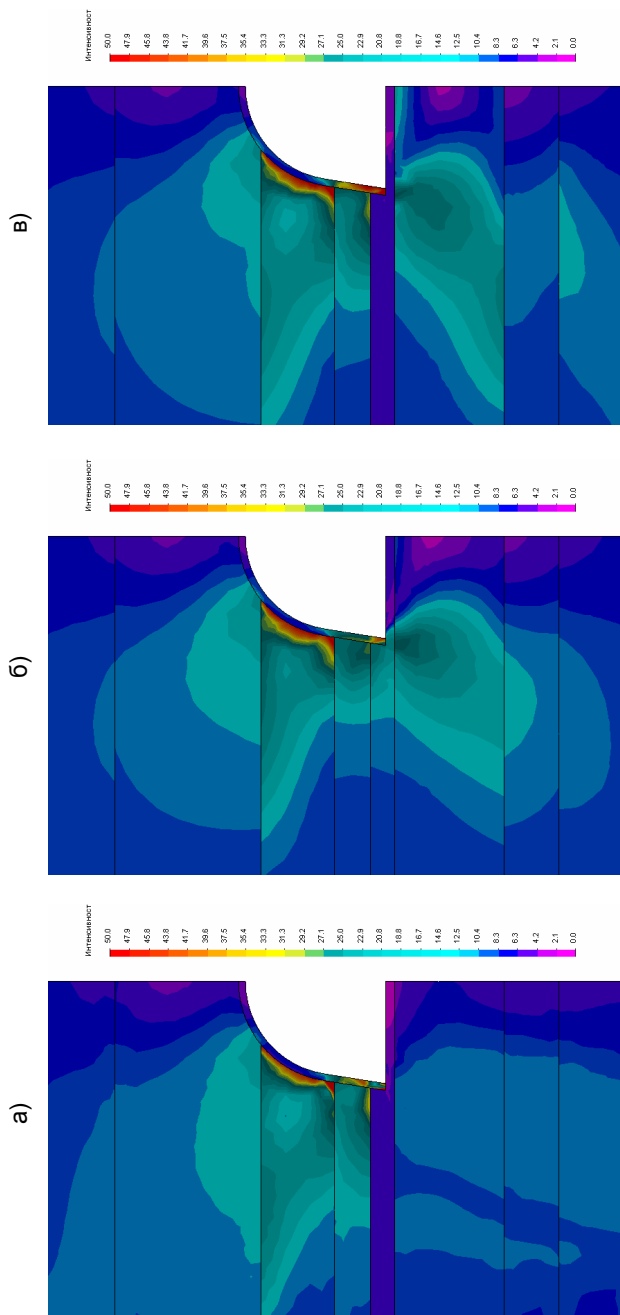


Рис. 4.8. Эпюры приведенных напряжений σ при варианте №2 структуры почвы (из табл. 4.2) и вариантах распределения механических характеристик из табл. 4.3): а) №2; б) №3; в) №6

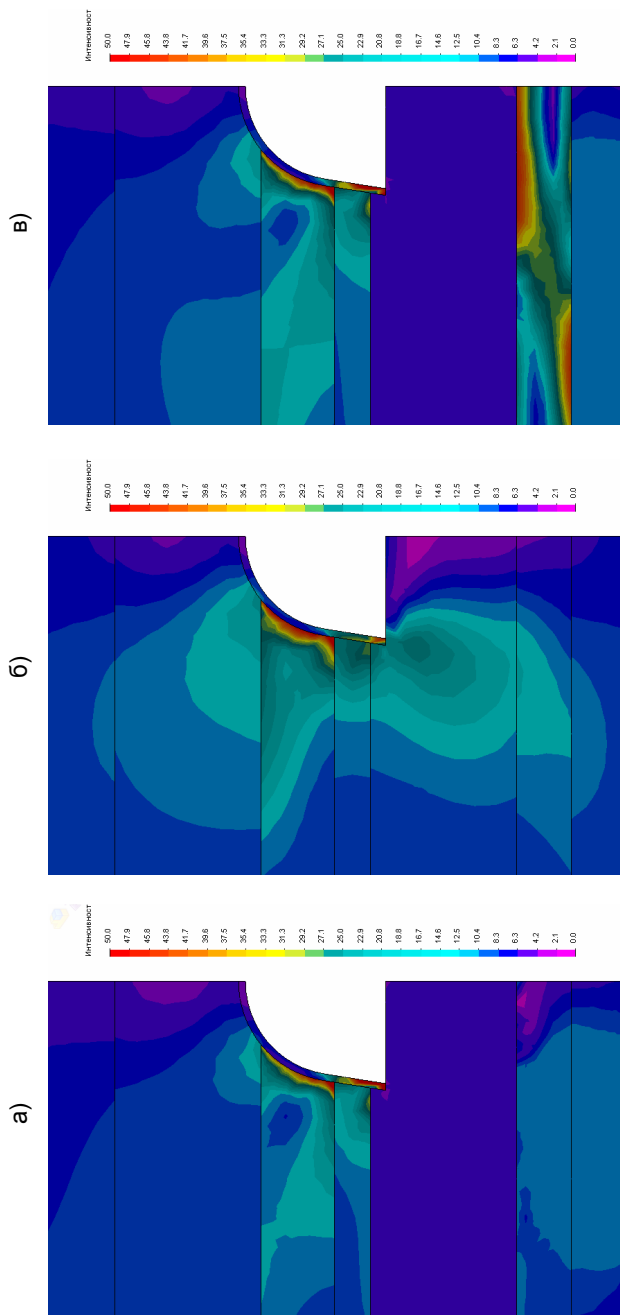


Рис. 4.9. Эпюры приведенных напряжений σ при варианте №3 структуры почвы (из табл. 4.2) и вариантах распределения механических характеристик из табл. 4.3): а) №2; б) №3; в) №6

Как и ранее, в варианте №6 залегания существенно неоднородных смежных слоев (см. рис. 4.9, в) наблюдаются наиболее значимые изменения поля σ , связанные с изменением мощностей породных слоев почвы:

- первый наиболее слабый слой характеризуется повсеместно предельным состоянием с практически равномерным полем приведенных напряжений σ , что усиливает процесс пучения почвы;

- третий породный слой также характеризуется более широкой областью предельного состояния, что увеличивает нагрузку на второй породный слой из песчаника;

- второй, более крепкий породный слой, имеет пониженную мощность (1,5 м), а нагрузка на него сформирована увеличенная как со стороны первого, так и третьего породных слоев; это приводит к значительному изгибу и разупрочнению песчаника, что усугубляет неустойчивое состояние почвы.

Таким образом, при залегании песчаника в основной почве развитие процесса пучения существенным образом зависит от мощностей близлежащих породных слоев.

Другие варианты структур (см. табл. 4.2) и соотношений механических характеристик (см. табл. 4.3) породных слоев почвы пластовой выработки подтверждают и дополняют выявленные закономерности, которые требуют осмысления в плане раскрытия механизма развития пучения в зависимости от структуры и свойств пород близлежащей слоистой почвы.

ВЫВОДЫ

Изучение закономерностей проявлений пучения почвы в подготовительных выработках шахт Западного Донбасса позволило обобщить результаты исследований, раскрыть механизм протекания геомеханических процессов в почве и создать основу для их прогнозной оценки.

1. Выполнено комплексное обоснование геомеханической модели системы «массив – пластовая выработка» в рамках выполнения главного условия – максимально достоверное отражение:

- структуры и свойств близлежащих пород кровли и почвы угольных пластов в полном диапазоне их колебаний с комплексным использованием данных геологических изысканий, прогнозной оценки изменения параметров, анализа существующих результатов исследований физико-механических свойств углевмещающих пород;

- точное воспроизведение паспорта проведения и крепления выработки с моделированием конструктивных особенностей элементов крепи;

- моделирование механических свойств всех элементов системы «массив – пластовая выработка» по полной диаграмме (предельное и предельное состояние породы, пластическое течение стали) деформирования их материалов.

2. Разработана методика проведения вычислительного эксперимента, включающая семь последовательных этапов расчета НДС системы и его анализа для наиболее объективного отражения поведения системы в диапазоне изменения ее параметров, характерном для горно-геологических и горнотехнических условий поддержания подготовительных выработок в Западном Донбассе. Для этого построен в табличной форме массив вариантов сочетаний геомеханических параметров системы, где использован принцип разделения ограниченного числа базовых вариантов (каждого из них) на группу подвариантов, что позволило, с одной стороны, учесть обширную вариацию условий, а с другой, – максимально экономить вычислительный ресурс и затраты времени на проведение расчетов.

3. Анализ результатов расчета НДС системы выявил неоднозначность влияния на процесс пучения структуры и свойств близлежащих пород почвы: с одной стороны, подтверждается общеизвестная тенденция снижения перемещений U_{II} почвы при увеличении сопротивления пород сжатию; с другой, – на процесс накладывается воздействие значительной неоднородности свойств (на определенных участках шахтных полей) смежных породных слоев (например, обводненный алевролит непосредственной почвы и значительно более крепкий песчаник основной почвы); это воздействие усиливается при большом диапазоне колебаний (по длине выработки) мощности смежных слоев и возможности разрушения маломощного песчаника. Установлены разные тенденции развития пучения с ростом объемов разупрочняющихся пород почвы, где одним из главных факторов являются особенности ее структуры, которые потребовали осмысления закономерностей в плане раскрытия механизма протекания этого геомеханического процесса.

5. ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА РАЗВИТИЯ ПУЧЕНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ

На основе анализа полей распределения компонент напряжений выявлены некоторые закономерности влияния на вид состояния слоистых пород почвы ее структуры и механических свойств. Изменение параметров состояния породы генерирует развитие ее перемещений в направлении свободных поверхностей, то есть, в полость выработки, что представляет наибольший интерес в плане оценки ее устойчивости. Поэтому основное внимание сосредоточено на проявлениях пучения как результате развития перемещений по глубине и ширине близлежащих породных слоев почвы пластовой выработки.

Сложившиеся в геомеханике представления о механизме возникновения и развития пучения пород почвы утверждают, что главным фактором является повышенное горное давление в боках выработки, действующее наподобие штампа на породы почвы. Весьма наглядно процесс выдавливания слабых пород в почве выработки показан в работе [61], где векторами проиллюстрировано изменение направления полных перемещений приконтурных пород от вертикального в кровле, косонаправленного в боках, практически горизонтального в районе опор стоек рамы до косонаправленного и вертикального в почве (с обратным знаком) ближе к вертикальной оси выработки. Аналогичное векторное представление получено и в настоящей работе, так как использована физическая модель горной породы, отражающая полную диаграмму ее деформирования, а именно стадии разупрочнения и разрыхления являются определяющими в процессе развития пластического течения в породах почвы.

Неоднозначность влияния структуры и свойств пород почвы на ее НДС предопределяет неоднозначность проявлений пучения в почве пластовой выработки. Здесь необходим исключительно комплексный подход в трактовании закономерностей; анализ эпюр перемещений почвы подкрепляется причинами, выявленными из анализа особенностей поля распределения каждой компоненты напряжений. Именно такая методология анализа позволила выявить и объяснить ряд принципиальных схем развития пучения почвы в подготовительных выработках. Следует отметить, что установленные закономерности развития пучения, связанные со структурой и свойствами близлежащих пород почвы угольного пласта, не противоречат, а дополняют и конкретизируют сложившиеся представления [37, 107] о механизме протекания данного процесса. Анализ НДС системы «массив – пластовая выработка» позволил выявить три общих фактора, генерирующих проявления пучения в подготовительных выработках:

– воздействие растягивающих вертикальных напряжений σ_y , формирующих зону (по форме «перевернутого» свода естественного равновесия) расслоения пород непосредственной и верхней части основной почвы;

– выдавливание весьма слабых пород, находящихся на стадии разупрочнения и разрыхления, в полость выработки под воздействием более крепкого угольного пласта, формирующего подобие зоны опорного давления в боках выработки, – так называемый «эффект штампа»;

– формирование в более крепких алевролитах и песчаниках относительно небольшой мощности квазипластических шарниров (под воздействием растягивающих и повышенных сжимающих горизонтальных напряжений σ_x), которые увеличивают подвижность данного слоя и могут интенсифицировать процесс пучения.

Все перечисленные факторы в той или иной степени присутствуют постоянно, однако преобладающее действие одного из них заложено в принцип разделения процесса пучения пород почвы на четыре возможных варианта развития, отражающих реальные горно-геологические условия поддержания пластовых выработок на шахтах Западного Донбасса.

Первая группа горно-геологических условий характеризуется достаточно устойчивым состоянием почвы пластовой выработки, когда ее близлежащие слои представлены разными по мощности и механическим свойствам литологическими разностями, но они все имеют повышенное (в горно-геологических условиях Западного Донбасса) расчетное сопротивление сжатию $\sigma_{сж_i}^{\Pi} \geq 20$ МПа с учетом дейст-

вия ослабляющих породу факторов. Здесь основная причина проявления пучения заключается в действии растягивающих вертикальных напряжений σ_y , которые формируют область частично разупрочненных пород, определяемой глубиной проникновения растягивающих σ_y , а ширина соответ-

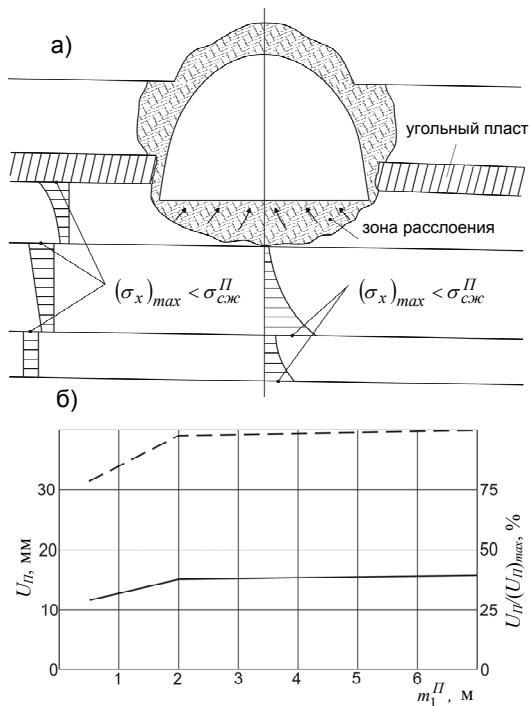


Рис. 5.1. Схема (а) деформирования близлежащих пород почвы с повышенным сопротивлением сжатию $\sigma_{сж_i}^{\Pi}$ и закономерности (б) развития перемещений U_{Π} с ростом мощности m_1^{Π} первого слоя: — U_{Π} ; - - $U_{\Pi}/(U_{\Pi})_{max}$

ет ширине выработки в проходке; форма области напоминает свод естественного равновесия, повернутый относительно вертикальной оси на 180° (рис. 5.1). Размеры области достаточно стабильны вне зависимости от структуры пород почвы, в ней происходит расслоение породы в вертикальном направлении (действие растягивающих σ_y), которое не усиливается другими факторами. Действительно, боковые области пород почвы (за пределами ширины выработки) находятся в устойчивом состоянии: в нижней части мощности каждого слоя растягивающих горизонтальных напряжений σ_x не возникает; в верхней части каждого слоя как сжимающие σ_x , так и приведенные напряжения σ далеки от величины сопротивления пород сжатию $\sigma_{сж_i}^II$. Таким образом, в данных областях породы почвы активно сопротивляются опорному давлению со стороны угольного пласта и «эффекта штампа» не наблюдается. С другой стороны, породные слои, залегающие ниже области расслоения (как правило, максимальная глубина в районе вертикальной оси выработки не превышает 2 – 2,5 м) под выработкой, также устойчивы по вышеприведенным причинам: в верхней части каждого слоя растягивающие σ_x не появляются, а в нижней части сжимающие σ_x и приведенные напряжения σ не превышают величины $\sigma_{сж_i}^II$ (см. рис. 5.1). Следовательно, квазипластические шарниры в породных слоях отсутствуют, а их состояние далеко от предельного. В итоге, пучение почвы генерируется исключительно ограниченной областью действия растягивающих вертикальных компонент σ_y , которые не способны создать сколь-нибудь существенных перемещений почвы в полость выработки, и в разных вариантах структуры почвы не приводит к превышению $U_{II} = 20...30$ мм.

Особенности влияния структуры пород почвы заключаются в следующем. Область распространения растягивающих σ_y достаточно постоянна: при тонком первом слое растягивающие σ_y проникают во второй более мощный слой почвы; при мощном первом слое растягивающие σ_y локализируются только в нем; растяжению литологические разности пород Западного Донбасса сопротивляются одинаково слабо, так, что процесс расслоения и перемещения пород изменяется не столь существенно. Алевролит и аргиллит как более слабые породы (по сравнению с песчаником второго и третьего слоев) с повышенными деформационными свойствами являются основным источником деформаций пород почвы, однако, их устойчивое состояние не позволяет развиваться перемещениям за пределами области растягивающих σ_y , что четко прослеживается на графиках (см. рис. 5.1, б). С ростом мощности алевролита от 0,5 до 2,0 м происходит увеличение перемещений почвы U_{II} всего на несколько миллиметров – это означает, что основной

вклад вносит зона расслоения от растягивающих σ_y . Но, так как абсолютные значения U_{II} малы, то относительное их увеличение (по отношению к максимуму $(U_{II})_{max}$ при $m_1^{II} = 7$ м) возрастает более существенно на 25 – 35%. При дальнейшем увеличении мощности алевролита интенсивность роста перемещений почвы еще более снижается и практически затухает при $m_1^{II} \geq 4$ м.

В целом, можно сделать вывод, что при расчетном (то есть, с учетом ослабляющих факторов) сопротивлении сжатию близлежащих породных слоев почвы не менее 20 МПа в ней не наблюдается сколь-нибудь существенных проявлений пучения на участках пластовой выработки, расположенных вне зоны влияния очистных работ. Поэтому первая группа горно-геологических условий не представляет практического интереса в ракурсе планирования мероприятий по борьбе с пучением пород почвы; по данному фактору эксплуатационное состояние выработки прогнозируется вполне удовлетворительным и в дальнейших исследованиях не рассматривается проанализированная группа горно-геологических условий.

Вторая группа горно-геологических условий является прямой противоположностью первой, поскольку отражает горно-геологическую ситуацию, когда близлежащие породные слои почвы представлены аргиллитами и алевролитами малой крепости, которые, к тому же, нередко обводнены. Потенциально это наиболее опасная (с точки зрения устойчивости пород почвы) группа горно-геологических условий; соответствующий механизм деформирования пород почвы отражен на рис. 5.2, а для систематизации дальнейших исследований формируемые представления названы нами «схема I

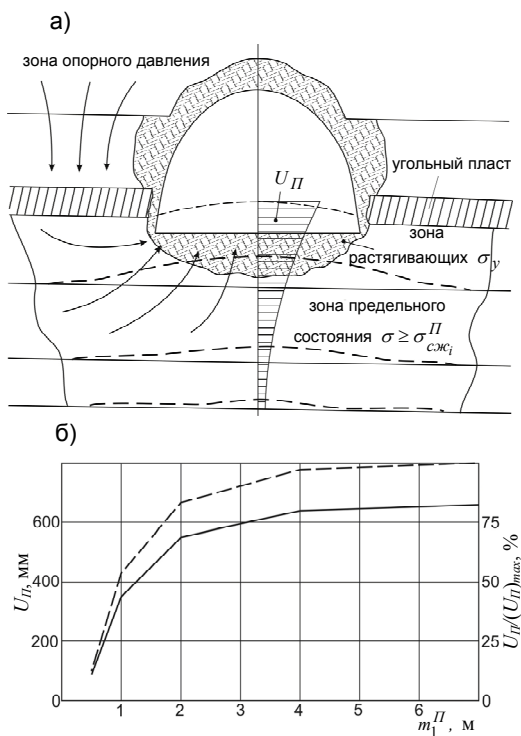


Рис. 5.2. Схема (а) деформирования близлежащих пород почвы с пониженным сопротивлением сжатию $\sigma_{сжi}^{II}$ и закономерно-сти (б) развития перемещений U_{II} с ростом мощности m_1^{II} первого слоя: — U_{II} ; — — $U_{II} / (U_{II})_{max}$

развития пучения».

Породы кровли создают повышенную нагрузку в боках выработки, которую воспринимает на себя угольный пласт как наиболее крепкий элемент, и передает эту нагрузку на слабые породы почвы, что приводит к появлению обширных областей предельного и запредельного их состояния. Породные слои испытывают изгиб в полость выработки, в процессе которого происходит их разрушение сначала в местах действия максимальных изгибающих моментов (см. рис. 5.2, а – в центральных сечениях каждого слоя и в боковых – в зонах опорного давления), а затем и по всей ширине пролета породных плит. Их неустойчивому состоянию способствуют повышенные горизонтальные сжимающие напряжения σ_x в почве под зонами опорного давления, которые в своей совокупности создают дополнительный опрокидывающий момент относительно нейтральной оси каждого породного слоя. Условием появления повышенных сжимающих σ_x является переход породы в предельное и запредельное состояния, обусловленное их низким сопротивлением сжатию. Таким образом, малая крепость пород (в том числе и по причине действия разупрочняющих факторов обводненности, трещиноватости и т. п.) сначала создает условия интенсивного прогиба породных слоев, затем усиливает изгиб за счет повышенных горизонтальных напряжений и в результате весь объем породы от одной зоны повышенного горного давления (в левом боку выработки) до другой (в правом боку) переходит в предельное и запредельное состояния, характеризующиеся не только разупрочнением, но и разрыхлением породы, которая, увеличиваясь в объеме, перемещается в направлении наименьшего сопротивления, то есть, в полость выработки. Данный вывод о формировании обширных зон предельного (запредельного) состояния пород почвы убедительно подтверждает серия расчетов НДС (см. §4.2) для разных вариантов структур, когда величина пучения U_{II} стабильно превышала 300 – 400 мм (для мощности первого слоя $m_1^{II} = 1,5...2$ м и более) при отсутствии в нижних слоях песчаника.

В то же время, если наиболее слабый первый породный слой имеет небольшую мощность ($m_1^{II} = 0,5...0,8$ м), а за ним залегает более крепкий алевролит или аргиллит, то пучение относительно невелико (до 150 – 200 мм). Но, с ростом m_1^{II} происходит резкая интенсификация пучения (см. рис. 5.2, б), обусловленная увеличением объема разрыхляющихся пород. Тем не менее, градиент роста функции $U_{II}(m_1^{II})$ имеет тенденцию к затуханию уже при $m_1^{II} \geq 2$ м (80 – 85% перемещения от максимального значения $(U_{II})_{max}$ при $m_1^{II} = 7$ м), а при $m_1^{II} \geq 4$ м пучение практически стабилизируется. Это явление обусловлено, на наш взгляд, двумя причинами: во-первых, с увеличением расстояния от выработки величина возмущений НДС массива затухает; во-вторых, увеличивающийся объем разрыхленных пород частично компен-

сируется сжатием более отдаленных пород, которые менее разупрочнены, но, тем не менее, обладают еще повышенной деформативностью. В этих условиях (когда расчетное сопротивление сжатию $\sigma_{сж_i}^{\Pi} \leq 10$ МПа) ярко проявляется пластическое течение пород почвы в классическом понимании явления пучения, которое затрагивает не только близлежащие, но и более отдаленные породные слои.

Существенно отличается механизм развития пучения при достаточно распространенной горно-геологической ситуации залегания в близлежащей почве пластовой выработки алевролита или аргиллита малой крепости и нижележащего более крепкого песчаника, где основными влияющими параметрами являются: мощность m_1^{Π} первого слоя, мощность m_2^{Π} второго слоя из песчаника, сопротивление сжатию $\sigma_{сж_3}^{\Pi}$ третьего слоя, представленного аргиллитом или алевролитом; возможен также вариант залегания песчаника в третьем слое после аргиллита или алевролита второго слоя.

На рис. 5.3, а показана принципиальная схема наиболее характерной структуры пород почвы, когда в первом слое залегает ослабленный аргиллит или алевролит, а за ним следует песчаник и более крепкий (чем породы первого слоя) алевролит или аргиллит. Данную группу горно-геологических условий отражает «схема II развития пучения».

Повышенная нагрузка в зоне опорного давления, воспринимаемая более крепким угольным пластом, передается на непосредственную почву из ослабленного (например, обводненного) аргиллита или алевролита. Низкое расчетное сопротивление сжатию первого слоя ($\sigma_{сж_1}^{\Pi} < 10$ МПа) способствует развитию в нем обширной

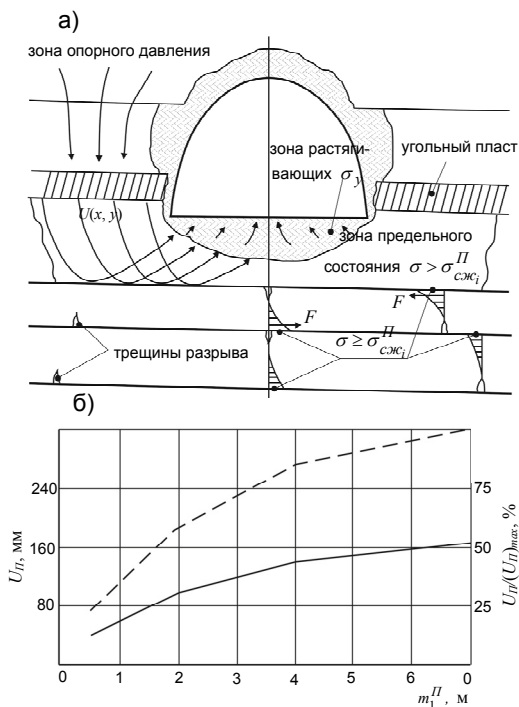


Рис. 5.3. Схема (а) деформирования существенно неоднородных близлежащих пород почвы и закономерности (б) развития перемещений U_{Π} с ростом мощности m_1^{Π} первого слоя при сохранении устойчивости нижележащего песчаника: — U_{Π} ; — — $U_{\Pi} / (U_{\Pi})_{max}$

области предельного и запредельного состояния, которая за счет разрыхления пород генерирует существенное пучение почвы. По этим же причинам сопротивляемость горному давлению в первом породном слое снижается и большая часть нагрузки передается на песчаник, мощность которого такова, что он сохраняет свое устойчивое состояние. В породной плите из песчаника под воздействием внешней нагрузки образуются концентрации горизонтальных напряжений σ_x (характеризующих изгиб плиты) в районе вертикальной оси выработки и в ее боках: в центре пролета породной плиты растягивающие σ_x располагаются в верхней части слоя, а повышенные сжимающие σ_x – в нижней; в боковых областях плиты (под зонами опорного давления) кривизна ее линии изгиба меняет знак и растягивающие σ_x появляются уже в нижней части плиты. Как известно, породы Западного Донбасса имеют весьма низкое сопротивление растяжению и в областях действия растягивающих σ_x образуются трещины разрыва, как это показано на рис. 5.3, а. Тем не менее, за счет сжимающих напряжений образуется пара результирующих сил F , создающая восстанавливающий момент, и породная плита находится в устойчивом состоянии, при условии, что приведенные напряжения σ (в областях действия сжимающих σ_x) не превышают сопротивления песчаника сжатию $\sigma_{сж2}^I$. При достаточной крепости нижележащих породных слоев (третьего и четвертого) в них происходят аналогичные процессы появления трещин разрыва только в областях действия растягивающих σ_x , не влекущие за собой потерю устойчивости основной почвы.

В этих условиях механизм развития пучения существенно преобразуется по причине расположения слабого разупрочненного слоя непосредственной почвы между двумя прочными слоями: сверху – угольный пласт, снизу – жесткий песчаник. Разупрочненный аргиллит или алевролит обладает значительной подвижностью (подобие пластического течения) и под воздействием «жесткого штампа» (угольный пласт) деформируются в вертикальном и горизонтальном направлениях, чему препятствует (помимо устойчивых пород в отдаленных областях боков выработки) целостный и жесткий песчаник в основной почве. Тогда перемещения алевролита не распространяются в глубь почвы, а их вектор изменяет направление от косонаправленного в глубь почвы до косонаправленного в сторону выработки: происходит как-бы «отражение» направления перемещений разупрочненного и разрыхленного алевролита от жесткой преграды в виде песчаника достаточной мощности. То есть, жесткий песчаник во втором породном слое усиливает проявления пучения за счет создания направленного течения нарушенной породы в полость выработки.

Такое представление о механизме протекания процесса пучения подтверждается серией расчетов для разной структуры близлежащей почвы (см. рис. 5.3, б). Здесь мощность первого слоя m_1^I играет более существен-

ную роль в сравнении с предыдущими схемами, так как от параметра m_1^{II} зависит избыточный объем разупрочненной и разрыхленной породы, направляемой песчанником в сторону выработки. Так, в отличие от предыдущей схемы (см. рис. 5.2, б, где при $m_1^{\text{II}} = 2$ м реализуется 80 – 85% перемещений U_{II} от максимального значения, а при $m_1^{\text{II}} = 4$ м рост U_{II} практически прекращается), песчанник провоцирует дальнейший рост U_{II} : при $m_1^{\text{II}} = 2$ м реализуется только 55 – 60%, а при $m_1^{\text{II}} = 4$ м – в районе 85% от максимального значения. Тем не менее, функция $U_{\text{II}}(m_1^{\text{II}})$ имеет тенденцию к выполаживанию при $m_1^{\text{II}} > 4$ м. В целом, можно сделать вывод, что на процесс пучения (в данных горно-геологических условиях) основное влияние оказывают два фактора: активизация перемещений слабого аргиллита или алевролита за счет жесткого основания, представленного песчанником; ограничение жестким песчанником перемещений нижележащих породных слоев почвы.

В представленных закономерностях также существенную роль играет величина удаления песчанника от контура выработки в плане размещения его, например, в третьем слое, а между нарушенным слоем и песчанником залегает слой более крепкого (необходненного) аргиллита или алевролита. Здесь проявляется общая тенденция снижения «эффекта жесткого основания» с увеличением глубины залегания песчанника, что предопределяет снижение интенсивности выдавливания пород первого слоя. К этому процессу добавляется воздействие второго более устойчивого слоя из аргиллита, который частично поглощает деформации первого слоя, что в совокупности приводит к пониженному пучению, с одной стороны, и повышенной «реализации» пучения при мощностях первого слоя до 2 м, с другой стороны, то есть механизм развития пучения приближается к схеме I.

Еще один вариант развития пучения пород почвы существенно отличается от рассмотренных и характеризуется следующей структурой: в непосредственной почве залегают породы малой крепости, второй породный слой представлен песчанником мощностью до 1,5 – 2 м, а в третьем слое залегает слабый алевролит или аргиллит. Поведение такой структуры (которая реально встречается в почве угольных пластов) с чередованием слоев пониженной и повышенной прочности характеризуется относительно независимым [61, 84] переходом каждого породного слоя в предельное и запредельное состояния, что подтвердили и проведенные расчеты. При весьма слабых породах первого и третьего слоев песчанник представляет собой жесткую плиту, нагруженную как со стороны своей кровли, так и со стороны почвы, причем распределение нагрузки достаточно невыгодно с точки зрения устойчивости песчанника. Действительно, в центральной части пролета плиты действует повышенная вертикальная нагрузка (в направлении выработки) от разупрочненного третьего слоя, которая изгибает плиту и раскрывает

трещины в области действия растягивающих σ_x . В боковых частях песчаника действует преимущественно вертикальная нагрузка от пластического течения первого породного слоя (рис. 5.4, а), которая формирует квазипластические шарниры в опорах плиты, вдавливая их в разупрочненный третий слой. Таким образом, возникают значительные изгибающие моменты в песчанике (что четко прослеживается на эпюрах σ_x в §4.2), которые способны его разрушить в сечениях, где изгибающий момент достигает максимума – в опорах плиты и в центральной части пролета. Это происходит при относительно небольшой мощности песчаника $m_2^{\text{II}} \leq 1,5 \dots 2$ м и создается из его блоков подобие распорной системы, которая, тем не менее, имеет некоторую реакцию сопротивления перемещению пород в сторону почвы выработки. Возникновение распорной системы в песчанике зависит не только от его мощности m_2^{II} , но и от мощностей первого m_1^{II} и третьего m_3^{II} слабых породных слоев. На графиках представлено влияние мощности m_1^{II} первого слоя на величину пучения U_{II} и эта закономерность отличается медленным ростом функции $U_{\text{II}}(m_1^{\text{II}})$, вид которой приближается к линейному. Объяснение этой закономерности раскрывается, на наш

взгляд, двумя факторами: повышенной подвижностью распорной системы в песчанике, которая усиливает интенсивность перемещений первого слоя в сторону выработки; усилением движения распорной системы в песчанике за счет пластического течения в третьем породном слое. Таким образом, когда оба фактора действуют в одном направлении, величина пучения напрямую связана с избыточным объемом пород от разрыхления, зависящего, в первую очередь, от мощности первого слоя. Такое поведение пород почвы вы-

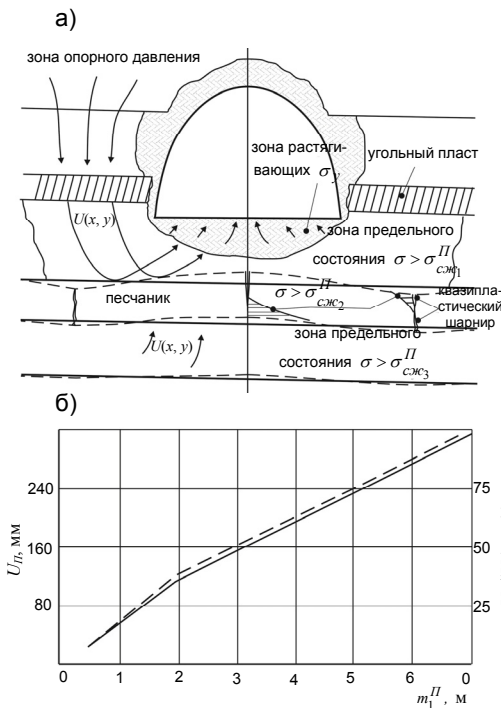


Рис. 5.4. Схема (а) деформирования существенно неоднородных близлежащих пород почвы и закономерности (б) развития перемещений U_{II} с ростом мощности m_1^{II} первого слоя при образовании в песчанике квазипластических шарниров: — U_{II} ; — — $U_{\text{II}}/(U_{\text{II}})_{\text{max}}$

выработки, двумя факторами: повышенной подвижностью распорной системы в песчанике, которая усиливает интенсивность перемещений первого слоя в сторону выработки; усилением движения распорной системы в песчанике за счет пластического течения в третьем породном слое. Таким образом, когда оба фактора действуют в одном направлении, величина пучения напрямую связана с избыточным объемом пород от разрыхления, зависящего, в первую очередь, от мощности первого слоя. Такое поведение пород почвы вы-

делено нами в отдельную «схему III развития пучения».

В итоге, результаты анализа НДС системы «массив – пластовая выработка» нашли свое логическое объяснение в предложенном механизме развития пучения (в подготовительных выработках), который отображен тремя принципиальными схемами ввиду того, что единого поведения разнообразной и неоднородной структуры почвы не может быть по самой природе геомеханических процессов. Поэтому, следующим необходимым этапом исследований является расширение расчетной базы в плане охвата реально существующих разнообразных структур и свойств близлежащих пород почвы для более полного раскрытия и уточнения как механизма развития пучения, так и закономерностей его протекания.

ВЫВОДЫ

1. Объяснение неоднозначных тенденций в развитии пучения почвы подготовительных выработок осуществлено на основе комплексного подхода, где анализ эпюр перемещений почвы подкреплен причинами, выявленными при изучении особенностей поля распределения каждой компоненты напряжений. Именно такая методология позволила установить три общих фактора, генерирующих проявления пучения, которые присутствуют постоянно, но преобладающее действие одного из них заложено в принцип разделения процесса пучения на три возможных варианта развития:

– воздействие растягивающих вертикальных напряжений σ_y , формирующих зону расслоения пород непосредственной и верхней части основной почвы;

– выдавливание весьма слабых пород, находящихся на стадии разупрочнения и разрыхления, в полость выработки под воздействием более крепкого угольного пласта, формирующего подобие зоны опорного давления в боках выработки, – так называемый «эффект штампа»;

– формирование в песчаниках и более крепких алевролитах относительно небольшой мощности квазипластических шарниров (под воздействием растягивающих и повышенных сжимающих горизонтальных напряжений σ_x), которые увеличивают подвижность данного слоя и могут интенсифицировать процесс пучения.

2. Отмеченные факторы нашли свое логическое объяснение в предложенном механизме развития пучения, который отображен тремя принципиальными схемами, раскрывающими природу геомеханических процессов в весьма неоднородной и разнообразной структуре пород почвы.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СВЯЗИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОРОД ПОЧВЫ С ЕЕ ПУЧЕНИЕМ

6.1. РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Руководствуясь общей методологией исследований и результатами предыдущих расчетов представляется целесообразным развить методику вычислительного эксперимента в плане детализации и систематизации исходных геомеханических параметров для получения надежных количественных закономерностей проявления пучения в почве подготовительных выработок. Развитие методики осуществлено по двум основным направлениям: детализация структуры близлежащих к угольному пласту пород почвы и конкретизация диапазона изменения расчетного сопротивления породных слоев сжатию в зависимости от интенсивности действия факторов их разупрочнения (обводненности, трещиноватости, реологии и т.д.). Оба направления обусловлены выявленными тремя схемами развития пучения в зависимости от структуры и свойств пород непосредственной и близлежащей основной почвы.

Первое направление связано с установленными тенденциями влияния мощности m_i^{II} породных слоев на проявление пучения. Причем, заметное влияние оказывают слои глубиной залегания до 6 м – этот факт четко согласуется с нормативной методикой [64], где в расчет принимаются литологические разности глубиной залегания до одной ширины выработки в проходке (применительно к нашей области исследований – 5,5 – 6 м). Таким образом, основной вклад в процесс пучения вносят 2 – 3 породных слоя, исключая маломощные (0,1 – 0,3 м) породные прослои и угольные пропластки, вероятность появления которых на глубине до 6 м невысока. Для повышения надежности установления закономерностей связи между величиной пучения U^{II} и мощностями m_i^{II} близлежащих породных слоев почвы необходимо предусмотреть достаточное количество вариантов изменения мощности каждого породного слоя. Это обеспечивают базовые варианты структуры (см. табл. 4.2), которые генерируют набор подвариантов (в соответствии с изложенной в главе 4 общей методологией) за счет объединения двух-трех слоев в единый более мощный путем исключения граничного условия раздела литологических разностей в конкретной модели.

В главе 4 установлена нелинейная связь параметров U^{II} и m_1^{II} , что обуславливает необходимость вычислений (при переменной m_1^{II}) в количестве не менее пяти-шести значений в интервале $0,5 \text{ м} \leq m_1^{\text{II}} \leq 5,5 \text{ м}$. Это легко осуществимо использованием базовых структур по табл. 4.2:

- $m_1^I = 0,5$ м – структура №2;
- $m_1^I = 1$ м – структура №4;
- $m_1^I = 2$ м – структура №1;
- $m_1^I = 3$ м – структура №5;
- $m_1^I = 4$ м – структура №3;
- $m_1^I = 5,5$ м – структура №3 при объединении первых двух породных слоев.

Второй породный слой, с учетом достаточной вероятности залегания как маломощного (порядка 1 м), так и мощного (до 5,5 м) песчаника, целесообразно рассчитать в интервале $1 \text{ м} \leq m_2^I \leq 5 \text{ м}$, что реализуется в следующих структурах:

- $m_2^I = 1$ м – структура №4;
- $m_2^I = 1,5$ м – структура №3;
- $m_2^I = 2$ м – структура №1;
- $m_2^I = 3$ м – структура №2;
- $m_2^I = 4$ м – структура №5;
- $m_2^I = 5$ м – структура №4 при объединении второго и третьего слоев почвы.

Третий породный слой обычно представлен аргиллитом или алевролитом разной мощности, а с учетом интересующей нас глубины до 6 м, интервал изменения m_3^I принят следующим $0,5 \text{ м} \leq m_3^I \leq 5,5 \text{ м}$.; при мощных первых двух слоях третий породный слой является маломощным, а в противоположном случае третий слой имеет повышенную мощность. Структуры, реализующие указанный интервал, приняты такие:

- $m_3^I = 0,5$ м – структура №3 при объединении первых двух слоев;
- $m_3^I = 1$ м – структура №5;
- $m_3^I = 2$ м – структура №1;
- $m_3^I = 3$ м – структура №3;
- $m_3^I = 4$ м – структура №4;
- $m_3^I = 5,5$ м – структура №2 при объединении третьего и четвертого слоев.

Перечисленные значения мощности первых трех породных слоев в своем сочетании ограничиваются обоснованной ранее глубиной исследуемой поч-

вы, поэтому, при маломощном первом (втором) слое рассчитывается комбинация с более мощным вторым (третьим) слоем и наоборот – таким способом существенно ограничивается число исследуемых структур, не снижая количества дискретных значений m_i^{II} для построения корреляционных зависимостей. В итоге по пяти базовым структурам отобрано семь вариантов, которые приняты к исследованию НДС пород почвы и приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

**ВАРИАНТЫ СТРУКТУРЫ ПОРОД ПОЧВЫ
НА ЗАВЕРШАЮЩЕМ ЭТАПЕ РАСЧЕТОВ**

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	
m_i^{II} , м	m_1^{II}	0,5	1	1	2	3	4	5,5
	m_2^{II}	3	1	5	2	4	1,5	3
	m_3^{II}	5,5	4	3	2	1	3	0,5

Второе направление связано с более детальным обоснованием диапазона изменения расчетного сопротивления R_i^{II} пород почвы, обусловленного не только вариацией предела прочности породы на одноосное сжатие $\sigma_{\text{сж}i}^{\text{II}}$ в образце, но и степенью влияния ослабляющих факторов: обводненности, трещиноватости и реологии.

Данные геологических изысканий свидетельствуют, что в почве пластов залегают (за редким исключением появления угольных пропластков мощностью 0,1 – 0,3 м) только три литологические разности: аргиллит, алевролит и песчаник.

Расчетное сопротивление пород почвы сжатию R_i^{II} в соответствии с руководящими нормативными документами [64, 65, 81] определяется по формуле

$$R_i^{\text{II}} = K_c K_w K_t \sigma_{\text{сж}i}^{\text{II}}, \quad (6.1)$$

в которую введен дополнительный коэффициент K_t , учитывающий реологический фактор снижения сопротивления сжатию во времени, весьма актуальный для слабых пород Западного Донбасса, характеризующихся существенной ползучестью.

В соответствии с перечисленными нормативными документами определены диапазоны изменения для литологических разностей пород почвы коэффициента K_c структурного ослабления (учитывающего среднее расстояние между поверхностями ослабления пород в массиве) и коэффициента K_w , учитывающего разупрочнение обводненных пород (табл. 6.2).

Таблица 6.2

ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ СТРУКТУРНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ K_c И ОБВОДНЕННОГО K_w МАССИВА

Тип породы	K_c	K_w
Аргиллит	0,4 – 0,9	0,5
Алевролит	0,6 – 0,9	0,6
Песчаник	0,8 – 0,9	0,8

Диапазон изменения коэффициента K_t , учитывающего реологический фактор, определен на базе широкомасштабных исследований [70, 91] ползучести пород Западного Донбасса и его значения приведены в табл. 6.3.

Используя данные табл. 6.2 и 6.3 по формуле (6.1) определены интервалы изменения расчетного сопротивления сжатию R_i^{II} пород почвы (табл. 6.4).

Таблица 6.3

ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА K_t , УЧИТЫВАЮЩЕГО РЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКТОР

Тип породы	Реологический показатель K / β	K_t
Аргиллит	0,2 – 0,5	0,71 – 0,89
Алевролит	0,2 – 0,5	0,71 – 0,89
Песчаник	0,1 – 0,3	0,84 – 0,95

Таблица 6.4

ИНТЕРВАЛЫ РАСЧЕТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СЖАТИЮ ПОРОД ПОЧВЫ ПЛАСТОВЫХ ВЫРАБОТОК

Тип породы	Расчетное сопротивление сжатию (сухая/обводненная) R_i^{II} , МПа
Аргиллит	<u>3,1 – 22,4</u> 1,6 – 11,2
Алевролит	<u>6,0 – 36,0</u> 3,6 – 21,6
Песчаник	<u>26,9 – 51,3</u> 21,5 – 41,0

Анализ данных табл. 6.4 указывает на достаточно широкий интервал изменения расчетного сопротивления сжатию R_i^{II} каждой литологической разности:

– аргиллиты – $R_i^{II} = 1,6...22,4$ МПа;

– алевролиты – $R_i^{II} = 3,6...36,0$ МПа;

– песчаники – $R_i^{II} = 21,5...51,3$ МПа.

Для ограничения указанных интервалов использованы результаты моделирования в части размежевания механизма развития пучения почвы по трем схемам и горно-геологических условий, когда величина пучения пород почвы требует проведения дополнительных мероприятий по обеспечению ее устойчивости. Поэтому, *во-первых*, варианты сочетаний расчетного сопротивления сжатию R_i^{II} по трем породным слоям почвы следует разграничить по каждой из трех схем развития пучения отдельно; *во-вторых*, варианты сочетаний R_i^{II} следует рассматривать только для случаев, когда величина пучения превышает допустимые нормы безопасной эксплуатации выработки. Руководствуясь изложенными соображениями, разработаны следующие варианты сочетаний расчетного сопротивления сжатию R_i^{II} близлежащих трех породных слоев почвы.

Схема I развития пучения предполагает залегание в трех близлежащих породных слоях почвы относительно однородных по механическим характеристикам пород малой крепости (слабые аргиллиты и алевролиты), так как результаты моделирования и шахтные наблюдения указывают на достаточную устойчивость почвы при расчетном сопротивлении сжатию $R_i^{II} > 10$ МПа.

Следовательно, нас интересует состояние пород почвы при $R_i^{II} < 10$ МПа, для чего разработаны следующие варианты сочетаний расчетного сопротивления сжатию трех близлежащих породных слоев (табл. 6.5).

Таблица 6.5

ВАРИАНТЫ ЗНАЧЕНИЙ РАСЧЕТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СЖАТИЮ R_i^{II} ПОРОД ПОЧВЫ ВЫРАБОТКИ ПРИ СХЕМЕ I РАЗВИТИЯ ПУЧЕНИЯ

Варианты		A_I	B_I	B_I	Γ_I	D_I	E_I
R_i^{II} , МПа	R_1^{II}	3	3	5	5	10	10
	R_2^{II}	5	10	3	10	3	5
	R_3^{II}	10	5	10	3	5	3

Схемы II и III развития пучения предусматривают залегание песчаника во втором породном слое, который либо сохраняет целостность, либо в нем образуется распорная система из породных блоков. Поэтому, второй породный слой имеет повышенную величину расчетного сопротивления сжатию, которую наиболее целесообразно отразить двумя значениями 30 и 50 МПа.

Также учтено, что пучение опасной величины развивается при весьма слабых породах первого и третьего слоя, что ограничено вышеприведенным условием $R_{1,3}^{II} < 10$ МПа. По данным положениям разработаны шесть вариантов сочетаний параметра R_i^{II} , подлежащих исследованию (табл. 6.6).

Таблица 6.6

ВАРИАНТЫ ЗНАЧЕНИЙ РАСЧЕТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СЖАТИЮ R_i^{II} ПОРОД ПОЧВЫ ВЫРАБОТКИ ПРИ СХЕМАХ II И III РАЗВИТИЯ ПУЧЕНИЯ

Варианты		$A_{II,III}$	$B_{II,III}$	$B_{II,III}$	$\Gamma_{II,III}$	$\Delta_{II,III}$	$E_{II,III}$
R_i^{II} , МПа	R_1^{II}	3	3	5	5	10	10
	R_2^{II}	30	50	50	30	30	50
	R_3^{II}	3	10	3	10	3	10

В заключение отметим, что остальные механические характеристики полной диаграммы деформирования породы соответствуют моделируемым литологическим разностям и обоснованы ранее в главе 4.

6.2. УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОРОД ПОЧВЫ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА НА ПРОЯВЛЕНИЯ ПУЧЕНИЯ В ПЛАСТОВЫХ ВЫРАБОТКАХ

6.2.1. ОТНОСИТЕЛЬНО ОДНОРОДНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЛИЗЛЕЖАЩИХ ПОРОДНЫХ СЛОЕВ ПОЧВЫ

В соответствии с положениями методики вычислительный эксперимент проведен по семи структурам (см. табл. 6.1) пород почвы и шести вариантам соотношений расчетного сопротивления R_i^{II} пород сжатию для схемы I развития пучения (см. табл. 6.5).

Анализ результатов вычислительного эксперимента по схеме I развития пучения почвы выполнен, когда она представлена относительно однородными по механическим характеристикам слабыми литологическими разностями с сопротивлением сжатию $R_i^{II} \leq 10$ МПа.

На рис. 6.1 приведены закономерности изменения величины пучения U^{II} с ростом мощности m_1^{II} первого породного слоя. В первую очередь, обращают внимание разные тенденции связи U^{II} и m_1^{II} в зависимости от расчетного сопротивления сжатию R_i^{II} первого породного слоя. Так, при наиболее слабом первом породном слое ($R_1^{\text{II}} = 3$ МПа) с увеличением его мощно-

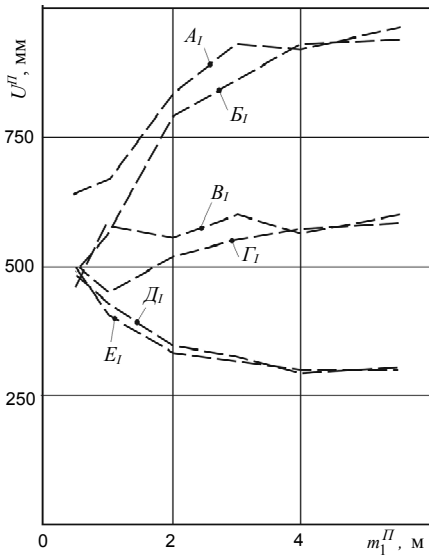


Рис. 6.1. Закономерности изменения величины пучения (по схеме I его развития) от мощности m_1^{II} первого породного слоя для вариантов сочетаний расчетного сопротивления сжатию R_i^{II} близлежащих породных слоев по табл. 6.5

сти происходит стабильный рост величины пучения для обоих вариантов A_I и B_I (см. табл. 6.5) соотношения R_i^{II} по близлежащим слоям. Эта тенденция роста объясняется тем, что наиболее слабый первый породный слой, находясь в запредельном состоянии, вносит основной вклад в развитие пучения и с увеличением m_1^{II} увеличивается объем пород на стадии разрыхления, а, следовательно, растет интенсивность их перемещения в полость выработки. Как видно из графиков, закономерность $U^{\text{II}}(m_1^{\text{II}})$ носит затухающий характер: с увеличением m_1^{II} градиент роста U^{II} снижается и при $m_1^{\text{II}} \geq 4$ м дальнейшее увеличение U^{II} невысоко и стабилизируется в районе 940 – 960 мм. Это означает, что при $m_1^{\text{II}} \geq 4$ м прочностные характеристики ниже лежащих породных слоев уже мало влияют на величину пучения, о чем свидетельствуют сближение графиков по вариантам A_I и B_I распределения по слоям расчетного сопротивления сжатию R_i^{II} . При $m_1^{\text{II}} < 4$ м влияние R_2^{II} и R_3^{II} более существенно – разница в вариантах A_I и B_I составляет: 30,6% при $m_1^{\text{II}} = 0,5$ м, 19,6% при $m_1^{\text{II}} = 1$ м, 5,1% при $m_1^{\text{II}} = 2$ м, 9,4% при $m_1^{\text{II}} = 3$ м и –1,1% при $m_1^{\text{II}} = 4$ м. Указанная разница обусловлена соотношением $R_2^{\text{II}} = 5$ МПа, $R_3^{\text{II}} = 10$ МПа для варианта A_I и $R_2^{\text{II}} = 10$ МПа, $R_3^{\text{II}} = 5$

МПа для варианта B_I . Она еще более усиливается разной мощностью второго и третьего слоев – в построении графиков не участвует структура №2 ($m_2^{II} = 1$ м, $m_3^{II} = 4$ м – см. табл. 6.1), для которой по отношению к структуре №3 ($m_2^{II} = 5$ м, $m_3^{II} = 3$ м) разница перемещений составляет – 23,6%, то есть в сумме (19,6% + 23,6%) влияние параметров $R_{2,3}^{II}$ и $m_{2,3}^{II}$ составила 43,2% при $m_1^{II} = 1$ м.

Закономерность $U^{II}(m_1^{II})$ существенно преобразуется при $R_1^{II} = 5$ МПа (варианты B_I и Γ_I соотношения по табл. 6.5) и здесь основной причиной является то, что расчетное сопротивление сжатию R_1^{II} первого слоя уже не является наименьшим из трех близлежащих породных слоев – оно занимает среднее значение по отношению к $R_{2,3}^{II} = 3$ МПа и 10 МПа. С ростом m_1^{II} происходит некоторое увеличение U^{II} от 460 мм ($m_1^{II} = 0,5$ м) до 600 мм ($m_1^{II} = 5,5$ м) для варианта B_I и от 500 до 585 мм для варианта Γ_I . В процентном отношении рост U^{II} составляет – 30,4% для варианта B_I и 17% для варианта Γ_I , что значительно меньше соответствующего роста U^{II} (50% для варианта A_I и 91,8% для варианта B_I) при $R_i^{II} = 3$ МПа. Закономерность $U^{II}(m_1^{II})$ также подвержена влиянию параметров $R_{2,3}^{II}$ (отклонения 28,9% при $m_1^{II} = 1$ м) и $m_{2,3}^{II}$ (отклонения – 31,1% с обратным знаком). Таким образом, и при $R_i^{II} = 5$ МПа имеет место существенное влияние параметров структуры и сопротивления сжатию нижележащих породных слоев при $m_1^{II} = 4$ м несмотря на низкий градиент изменения $U^{II}(m_1^{II})$.

Еще один вид закономерности $U^{II}(m_1^{II})$ наблюдается, когда первый породный слой слагает наиболее крепкая порода ($R_1^{II} = 10$ МПа) по отношению к нижележащим слоям ($R_{2,3}^{II} = 3$ и 5 МПа). Здесь используются варианты D_I и E_I соотношения расчетного сопротивления сжатию R_1^{II} из табл. 6.5, разница между которыми по величине U^{II} уже менее значительна, чем у вышеописанных вариантов; очевидно, сказывается преимущественное влияние более крепкого первого породного слоя. Максимум пучения порядка 485 мм (вариант D_I) и 500 мм (вариант E_I) наблюдается при минимальной мощности $m_1^{II} = 0,5$ м и это вполне закономерно, так как имеет место минимальное влияние более крепкого породного слоя, а основной вклад в разви-

тие пучения вносят нижележащие более слабые породные слои. Также закономерен факт минимальной разницы в перемещениях U^{II} при $m_1^{\text{II}} = 0,5$ м для всех вариантов распределения R_1^{II} вне зависимости от величины расчетного сопротивления сжатию R_1^{II} первого породного слоя, что указывает на связь интенсивности его влияния с мощностью m_1^{II} . Далее, по мере увеличения m_1^{II} , влияние первого породного слоя усиливается, что выражается в снижении величины пучения, которая при $m_1^{\text{II}} \geq 4$ м стремится к стабильному значению $U^{\text{II}} = 295 \dots 305$ мм.

По итогам выявленных закономерностей развития пучения по схеме I залегания слабых и относительно однородных пород в близлежащих слоях почвы можно сделать следующие выводы:

- наблюдается разная степень влияния параметров R_1^{II} и m_1^{II} в зависимости от мощности m_1^{II} первого породного слоя;

- при малой мощности $m_1^{\text{II}} = 0,5$ м влияние R_1^{II} минимально, а величина пучения определяется параметрами нижележащих слоев;

- при повышенной мощности первого породного слоя ($m_1^{\text{II}} > 4$ м) влияние нижележащих слоев сводится к минимуму и определяющим фактором в развитии пучения является только сопротивление сжатию R_1^{II} первого породного слоя;

- в интервале $0,5 \text{ м} \leq m_1^{\text{II}} \leq 4 \text{ м}$ на величину пучения оказывает влияние все исследуемые параметры R_i^{II} и m_i^{II} , но с разным удельным вкладом в этот процесс.

По сформулированным выводам проанализированы тенденции влияния параметров R_i^{II} и m_i^{II} на величину пучения U_{II} , которые составляют базу для прогнозирования этого явления путем построения корреляционных связей. При $m_1^{\text{II}} > 4$ м решающее влияние оказывает только один параметр (помимо глубины H размещения выработки) – расчетное сопротивление первого породного слоя сжатию R_1^{II} . На рис. 6.2 четко прослеживается обратно пропорциональная связь U^{II} и R_1^{II} при разных значениях m_1^{II} : при $m_1^{\text{II}} < 2$ м обратно пропорциональная связь выражена менее явно, так как здесь присутствует существенное влияние параметров $R_{2,3}^{\text{II}}$ и $m_{2,3}^{\text{II}}$ нижележащих породных слоев (см. рис. 6.1); с увеличением m_1^{II} это влияние ослабевает и

при $m_1^{II} > 4$ м практически исчезает. В данной области в закономерность связи U^{II} и R_1^{II} остальные параметры не вносят существенных искажений, что обуславливает достоверность ее аппроксимации уравнением вида (пунктирная кривая на рис. 6.2)

$$U^{II}(R_1^{II}) = \frac{2980}{R_1^{II}}, \text{ мм.} \quad (6.2)$$

Для обоснования функции связи U^{II} и m_1^{II} использованы графики на рис. 6.1, которые указывают на необходимость выбора аппроксимирующего уравнения, обеспечивающего стабилизацию величины U^{II} при $m_1^{II} > 4$ м вне зависимости от значений остальных параметров. Здесь в наибольшей степени подходит функция с одним из слагаемых в виде экспоненты с аргументом m_1^{II} , которая дает асимптотическое приближение уравнения $U^{II}(m_1^{II})$ при больших m_1^{II} к некоторому постоянному значению

$$U^{II}(m_1^{II}) = \frac{a_1}{1 + a_2 \exp(-a_3 m_1^{II})}, \quad (6.3)$$

где a_1 , a_2 , a_3 – коэффициенты аппроксимации.

Теперь перейдем к оценке влияния параметров $R_{2,3}^{II}$ и $m_{2,3}^{II}$ нижележащих породных слоев в диапазоне $m_1^{II} \leq 4$ м. В руководящих нормативных документах [64, 66] усредненное расчетное сопротивление сжатию пород неоднородной почвы вычисляется как «средневзвешенная» величина суммированием произведения сопротивления сжатию R_i^{II} на коэффициент влияния каждого слоя, определяемый в зависимости от его мощности m_i^{II} и расстояния расположения от поверхности почвы выработки. То есть, возникает предположение об учете степени влияния нижележащих породных слоев по комбинированному параметру

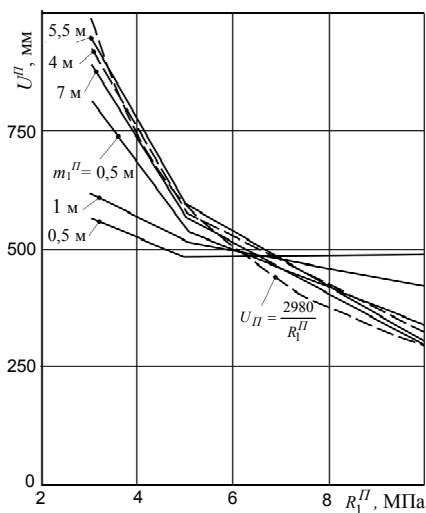


Рис. 6.2. Закономерность изменения величины пучения U^{II} от расчетного сопротивления сжатию R_1^{II} породы первого слоя при различной его мощности m_1^{II}

$$\Pi = \varphi(R_{2,3}^{\Pi}, m_{2,3}^{\Pi}), \quad (6.4)$$

целесообразность использования которого проверяется по результатам вычислительного эксперимента.

Влияние «средневзвешенного» расчетного сопротивления второго и третьего слоев оценено по отношению к расчетному сопротивлению сжатию первого слоя R_1^{Π} ; таким образом формируется некий обобщенный параметр Π

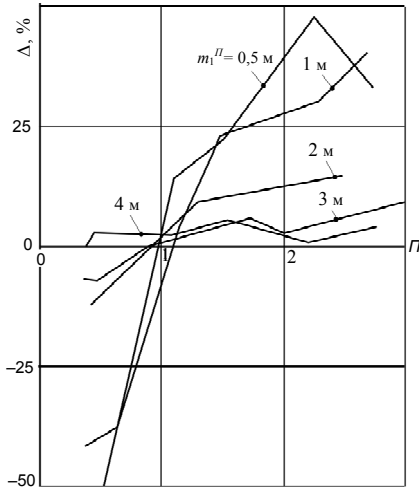


Рис. 6.3. Относительное изменение Δ величины пучения в зависимости от обобщенного параметра Π влияния нижележащих породных слоев при разной мощности m_1^{Π} первого слоя

$$\Pi = \frac{K_2 m_2^{\Pi} R_2^{\Pi} + K_3 m_3^{\Pi} R_3^{\Pi}}{(K_2 m_2^{\Pi} + K_3 m_3^{\Pi}) R_1^{\Pi}}, \quad (6.5)$$

показывающий удельный вес сопротивления сжатию $R_{2,3}^{\Pi}$ нижележащих слоев по отношению к первому слою R_1^{Π} (здесь K_2 и K_3 – коэффициенты влияния мощностей $m_{2,3}^{\Pi}$ второго и третьего породных слоев; изменяется в интервале $0 \leq K_{2,3} \leq 1$). Также было установлено, что влияние перечисленных параметров на величину пучения существенным образом зависит от мощности m_1^{Π} первого породного слоя в диапазоне $m_1^{\Pi} < 4$ м; поэтому прослежены

закономерности связи пучения U^{Π} с обобщенным параметром Π для разных дискретных значений m_1^{Π} в соответствии с исследуемыми вариантами

структур почвы (см. табл. 6.1). Кроме того, наиболее информативной величиной, подверженной влиянию параметра Π , будет не абсолютное, а относительное значение изменения пучения

$$\Delta = \frac{U_y^{\Pi} - U^{\Pi}}{U_y^{\Pi}} 100\%, \quad (6.6)$$

где U^{Π} – текущая величина пучения для конкретного значения мощности m_1^{Π} первого породного слоя;

U_y^{Π} – установившаяся величина пучения при $m_1^{\Pi} = 5,5$ м (вариант №6

структуры по табл. 6.1).

Закономерности изменения $\Delta(\Pi)$ приведены на рис. 6.3 (при $K_2 = K_3 = 1$) для пяти значений мощности m_1^{Π} первого слоя, которые подтверждают ранее выявленную тенденцию снижения интенсивности влияния нижележащих породных слоев при увеличении мощности первого слоя. Из графиков видно, что при $m_1^{\Pi} = 4$ м влияние параметра Π можно оценить как несущественное – отклонения в величине пучения составляют 0 – 5,8% для всех вариантов соотношения расчетного сопротивления сжатию R_i^{Π} из табл. 6.5. При $m_1^{\Pi} = 3$ м уже проявляется некоторое возрастание Δ (при увеличении Π) от – 6,7% (вариант E_I) до 9,6% (вариант B_I , см. табл. 6.5). Дальнейшее снижение мощности первого слоя приводит к увеличению градиента возрастания функции $\Delta(\Pi)$ при одновременном расширении диапазона колебаний отклонения Δ : так, при $m_1^{\Pi} = 1$ м величина Δ изменяется в интервале от 41% (вариант D_I) до 40,4% (вариант B_I); при $m_1^{\Pi} = 0,5$ м диапазон Δ увеличивается от – 66,7% (вариант E_I) до 47,9% (вариант B_I).

При малых значениях параметра Π (определяется пониженными значениями $R_{2,3}^{\Pi}$ в сравнении с R_1^{Π}) влияние нижележащих породных слоев происходит в сторону увеличения пучения, что вполне объяснимо и соответствует существующим представлениям и нормативным методикам прогноза; при повышенных значениях Π влияние нижележащих слоев происходит в сторону снижения пучения, что также не противоречит известным исследованиям. Обращают внимание такие общие черты в закономерностях $\Delta(\Pi)$ при разных мощностях m_1^{Π} :

- во-первых, более интенсивный рост функции $\Delta(\Pi)$ в области $\Pi \leq 1,1 \dots 1,5$ и некоторое выполаживание $\Delta(\Pi)$ в области $\Pi > 1,1 \dots 1,5$;
- переход из отрицательных значений Δ (увеличение пучения) в положительные (снижение пучения) происходит в интервале $0,9 \leq \Pi \leq 1,1$ (за исключением графика для $m_1^{\Pi} = 4$ м, где влияние нижележащих слоев практически отсутствует); значение $\Pi = 1$ характеризует одинаковую величину расчетного сопротивления сжатию всех трех слоев, то есть однородность почвы по фактору R_i^{Π} и в этом случае изменение мощности какого-либо слоя в пользу другого на величину пучения не должно влиять.

Достаточно постоянный характер закономерностей $\Delta(\Pi)$ при разных мощностях первого слоя указывает на то, что обобщенный параметр Π по формуле (6.5) вполне объективно отражает влияние параметров $m_{2,3}^{\Pi}$ и $R_{2,3}^{\Pi}$

нижележащих слоев, что использовано при выводе уравнений регрессии для прогноза пучения пород почвы пластовой выработки по схеме I развития этого процесса.

6.2.2. СУЩЕСТВЕННО НЕОДНОРОДНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЛИЗЛЕЖАЩИХ ПОРОДНЫХ СЛОЕВ ПОЧВЫ

Схемы II и III развития пучения почвы пластовой выработки характеризуются размещением песчаника разной мощности непосредственно под слабым аргиллитом или алевролитом.

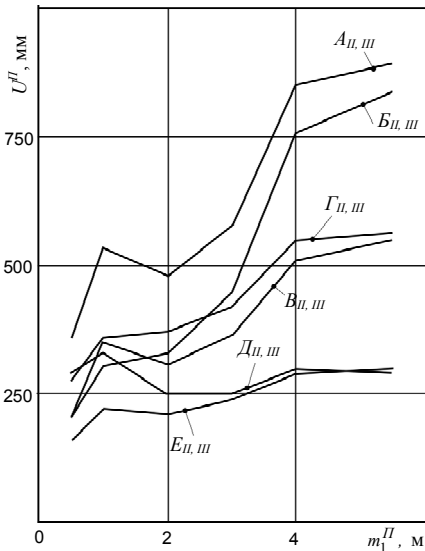


Рис. 6.4. Закономерности изменения величины пучения (по схемам II и III его развития) от мощности m_1^{II} непосредственной почвы для вариантов сочетаний расчетного сопротивления сжатию R_i^{II} близлежащих слоев по табл. 6.5

Наличие песчаника во втором слое почвы существенно изменяет закономерности развития величины пучения U^{II} с ростом мощности m_1^{II} непосредственной почвы, представленной слабым аргиллитом (рис. 6.4). Здесь, в отличие от схемы I наблюдается стабильная закономерность возрастания U^{II} с увеличением мощности m_1^{II} непосредственной почвы вне зависимости от ее расчетного сопротивления сжатию R_1^{II} , тем меньше градиент роста U^{II} , что обусловлено снижением объема разрыхленных пород первого слоя, «выдавливаемых» жесткими угольным пластом и песчаником в полость выработки. Рост функции $U^{\text{II}}(m_1^{\text{II}})$ объясняется тем, что при слабой непосредственной почве увеличение ее мощности m_1^{II} способствует увеличению объема наиболее подвижных разупрочненных пород, которые при своем перемещении в глубь почвы

(от жесткого угольного пласта) изменяют направление смещений благодаря жесткому песчанику и излишек их объема (от разупрочнения и разрыхления) имеет одно свободное направление движения – полость выработки. Влияние мощности m_1^{II} с ее увеличением ослабевает и, также, как при схеме I развития пучения, можно оценить как несущественное увеличение U^{II} при

$m_1^{\text{II}} > 4$ м – объяснение этому явлению дано ранее в §6.2.1.

В общей достаточно стабильной закономерности роста U^{II} с увеличением m_1^{II} прослеживаются два участка возмущения функции $U^{\text{II}}(m_1^{\text{II}})$ при $m_1^{\text{II}} = 0,5 - 1$ м и $m_1^{\text{II}} = 3...4$ м вне зависимости от распределения R_i^{II} по близлежащим породным слоям. На наш взгляд, эти возмущения (резкий рост пучения U^{II}) обусловлены малой мощностью песчаника ($m_2^{\text{II}} = 1$ м при $m_1^{\text{II}} = 1$ м и $m_2^{\text{II}} = 1,5$ м при $m_1^{\text{II}} = 4$ м), который под влиянием вышележащего и нижележащего слабых разупрочняющихся слоев теряет целостность и в меньшей степени сопротивляется пучению почвы. Этот процесс потери целостности песчаника основной почвы под воздействием проявлений горного давления требует дополнительного изучения в части определения условий возникновения данного явления.

Обращает внимание, что при некоторых сочетаниях структуры m_i^{II} почвы и расчетного сопротивления сжатию R_i^{II} близлежащих породных слоев, в том числе слабого аргиллита, проявления пучения не столь значительны и находятся в пределах допустимой величины $U_{\text{дон}}^{\text{II}}$, которая оценивается специалистами [3, 109, 110] на уровне

$$U_{\text{дон}}^{\text{II}} \leq 200...300 \text{ мм.} \quad (6.7)$$

Установлено, что на ограничение пучения оказывают влияние все исследуемые параметры R_i^{II} и m_1^{II} , удельный вклад которых следует изучить более подробно.

На рис. 6.5 основное внимание уделено воздействию на величину U^{II} расчетного сопротивления сжатию R_1^{II} и мощности m_1^{II} непосредственной почвы. Аналогично схеме I развития пучения при $m_1^{\text{II}} > 4$ м влияние структуры и свойств нижележащих слоев становится несущественным: так, при $m_1^{\text{II}} = 5,5$ м увеличение R_2^{II} с 30 до 50 МПа и R_3^{II} с 3 до 10 МПа приводит к

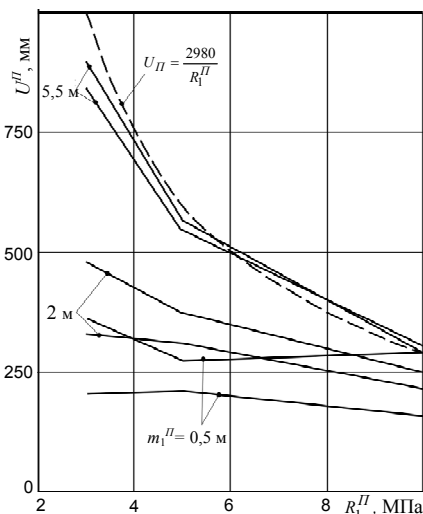


Рис. 6.5. Закономерности изменения величины пучения U^{II} от расчетного сопротивления сжатию R_1^{II} пород непосредственной почвы при различной ее мощности m_1^{II} , структуре и свойствах основной почвы (см. табл. 6.1 и 6.6)

изменению величины пучения в пределах 0 – 6,1%. Также обращает внимание, что при незначительном влиянии нижележащих слоев почвы закономерность $U^{\Pi}(R_1^{\Pi}, m_1^{\Pi})$ описывается тем же уравнением (6.2), что и при схеме I развития пучения (см. рис. 6.2 и 6.5, пунктирная линия). При $m_1^{\Pi} < 4$ м влияние нижележащих слоев возрастает, а величина пучения уменьшается вплоть до допустимого значения $U_{дон}^{\Pi}$ за счет более крепкого песчаника,

залегающего в основной почве (второй слой): при увеличении R_2^{Π} с 30 до 50 МПа пучение снижается до 43% при $m_1^{\Pi} = 0,5$ м и до 31,3% при $m_1^{\Pi} = 2$ м.

Для описания установленного влияния структуры и свойств основной почвы использован обобщенный параметр Π по формуле (6.5) по аналогии со схемой I развития пучения. Здесь наиболее представительным является сравнение вариантов №2 и №3 структуры почвы по табл. 6.1, для которых мощность непосредственной почвы постоянна ($m_1^{\Pi} = 1$ м), а мощности нижележащих слоев различные, также как и их сопротивление сжатию по вариантам из табл. 6.6.

Закономерности влияния (рис. 6.6) обобщенного параметра Π не так явно выражены, как при схеме I развития пучения, так как при схемах II и III (при небольшой мощности непосредственной почвы) существенное воздействие оказывает песчаник основной почвы, причем, как величина его расчетного сопротивления сжатию R_2^{Π} , так и мощность m_2^{Π} . На это влияние накладываются также переменные параметры R_3^{Π} и

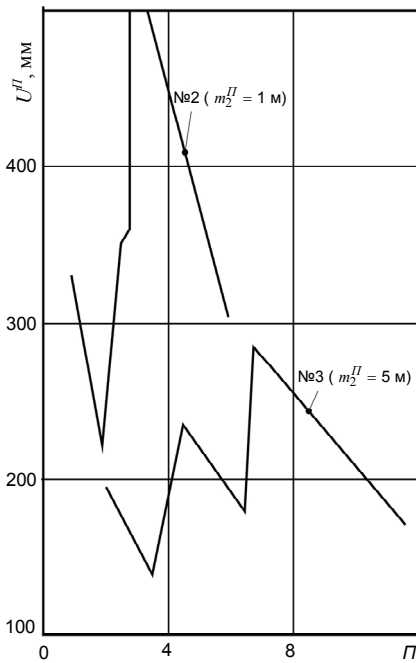


Рис. 6.6. К оценке влияния на величину пучения структуры и сопротивления сжатию пород основной почвы при пониженной мощности ($m_1^{\Pi} = 1$ м) непосредственной почвы (структуры №2 и №3 из табл. 6.1)

m_3^{Π} в совокупности с разной величиной R_1^{Π} (по табл. 6.6). Тем не менее, четко прослеживается закономерность значительного ограничения пучения при залегании в основной почве песчаника мощностью $m_2^{\Pi} = 5$ м: при любых соотношениях других параметров U^{Π} уменьшается от 1,53 раз (вариант

$\Gamma_{II,III}$) до 1,94 раз (вариант $B_{II,III}$) и величина этого снижения относительно стабильна (в указанном диапазоне) для всех вариантов соотношения R_i^{II} по табл. 6.6. Причем, при $R_2^{II} = 50$ МПа величина пучения стабильно меньше 200 мм для всех вариантов соотношения R_i^{II} ; здесь следует напомнить, что по геологическим прогнозам на отдельных участках шахтных полей мощность песчаника составляет $m_2^{II} \geq 5$ м, так, что данное исследование имеет реальное отражение в геологических структурах.

Максимумы U^{II} по графикам на рис. 6.6 соответствуют, как правило, пониженному сопротивлению сжатию песчаника $R_2^{II} = 30$ МПа наряду с пониженной прочностью остальных слоев – отсюда появились значительные диапазоны колебаний U^{II} в разных вариантах сочетаний R_i^{II} . Кроме того, на эпюрах компонент напряжений четко видно сохранение целостности песчаника для варианта структуры №3 ($m_2^{II} = 5$ м) и преимущественно нарушение целостности песчаника в варианте №2 ($m_2^{II} = 1$ м), что в итоге проявляется в увеличении пучения почвы (см. рис. 6.6).

По итогам проведенного анализа результатов моделирования по трем схемам развития пучения возникает ряд очередных задач по обеспечению надежности и достоверности прогнозирования проявлений пучения почвы пластовой выработки:

- проведение корреляционно-дисперсионного анализа с построением уравнений регрессии для расчета величины пучения;
- определение областей удовлетворительного эксплуатационного состояния почвы, где не требуется проведения специальных мероприятий;
- разграничение областей по схемам I, II и III развития пучения для повышения надежности и достоверности прогнозирования пучения.

7. ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОЧВЫ ПЛАСТОВЫХ ВЫРАБОТОК

7.1. ПОСТРОЕНИЕ УРАВНЕНИЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ ПУЧЕНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ

Для реализации сформулированных выше задач необходимо, прежде всего, построить уравнения регрессии для расчета величина пучения U^{II} как функции параметров R_i^{II} и m_i^{II} . Такая операция выполнена на базе расчетных данных моделирования геомеханических процессов по вариантам структуры почвы (табл. 6.1) и вариантам сочетания прочностных свойств пород R_i^{II} для схемы I (табл. 6.5) и схем II и III (табл. 6.6) развития пучения.

Предварительно было установлено, что при $m_1^{\text{II}} > 4$ м влияние параметров $R_{2,3}^{\text{II}}$ и $m_{2,3}^{\text{II}}$ основной почвы незначительно, а закономерность изменения пучения от параметров R_1^{II} и m_1^{II} непосредственной почвы наиболее надежно описывается функциями (6.2) и (6.3). Данный факт служит косвенным подтверждением достоверности моделирования, поскольку отражает единую природу процесса, когда вне зависимости от схем I, II и III развития пучения при мощной непосредственной почве различия в структуре и свойствах пород почвы нивелируются и объединяются в единый геомеханический процесс пучения пород почвы пластовой выработки.

При пониженной мощности непосредственной почвы проявляется существенное влияние на величину пучения U^{II} параметров $R_{2,3}^{\text{II}}$ и $m_{2,3}^{\text{II}}$ основной почвы, в качестве характеристики которой предложен обобщенный параметр Π по формуле (6.5). Этот параметр можно представить как аналог относительного «средневзвешенного» расчетного сопротивления сжатию трех близлежащих породных слоев почвы, а коэффициенты K_2 и K_3 отражают влияние мощности слоев основной почвы и их удаление от поверхности почвы выработки. Корреляционно-дисперсионный анализ результатов расчетов НДС пород почвы выявил наиболее достоверные значения этих коэффициентов (с надежностью 0,82), при которых обобщенный параметр приобретает вид

$$\Pi = \frac{0,6m_2^{\text{II}} + 0,4m_3^{\text{II}} R_3^{\text{II}}}{(0,6m_2^{\text{II}} + 0,4m_3^{\text{II}}) R_1^{\text{II}}}. \quad (7.1)$$

Анализ закономерностей влияния параметров R_i^{II} и m_i^{II} на величину пучения U^{II} привел с учетом (7.1) к основному выводу: не только в качественном, но и отчасти в количественном плане эти закономерности однотипны, что

отражает единую природу явления пучения. Отличия между собой выявленных схем I, II и III развития пучения заключаются в особенностях влияния мощности m_1^{II} непосредственной почвы, которое наиболее целесообразно представить в виде сомножителя к постоянной функции $U^{\text{II}}(R_i^{\text{II}}, m_i^{\text{II}})$.

Более наглядно особенности влияния m_1^{II} при разных схемах развития пучения отражены на рис. 7.1, где при одинаковых параметрах $R_{1,3}^{\text{II}}$ и $m_{1,3}^{\text{II}}$ приведены зависимости $U^{\text{II}}(m_1^{\text{II}})$ для всех трех схем. Из графиков видно, что песчаник ($R_2^{\text{II}} = 40$ МПа) в основной почве сдерживает развитие пучения, а более интенсивно ограничивается этот процесс, когда песчаник сохраняет целостность (схема II) по причине своей повышенной мощности m_2^{II} . Пунктирными линиями показана гипотетическая ситуация отсутствия разрыхления непосредственной почвы, тогда эффект «отражения» песчаником перемещений пучащего первого слоя исчезает, а сама величина U^{II} становится еще меньше, что вполне отражает природу явления пучения. Таким образом, налицо двойное влияние песчаника основной почвы: с одной стороны, он ограничивает пучение за счет своей повышенной крепости, с другой стороны, усиливает пучение непосредственной почвы за счет эффекта «отражения» ее перемещений в направлении полости выработки; но, первая сторона влияния песчаника является преобладающей. Также обращает внимание однотипность или подобие закономерностей $U^{\text{II}}(m_1^{\text{II}})$ для всех трех схем развития пучения.

В итоге получены следующие уравнения регрессии с достаточно высоким коэффициентом множественной корреляции (0,69 – 0,76), что характеризует надежность выявленных зависимостей для прогноза величины пучения пород почвы пластовой выработки:

$$U^{\text{II}} = \frac{2980\Phi_{I,II,III}K_H K_S}{R_1^{\text{II}} + \left(\frac{0,6m_2^{\text{II}}R_2^{\text{II}} + 0,4m_3^{\text{II}}R_3^{\text{II}}}{0,6m_2^{\text{II}} + 0,4m_3^{\text{II}}} - R_1^{\text{II}} \right) \exp(-0,8m_1^{\text{II}})}, \quad (7.2)$$

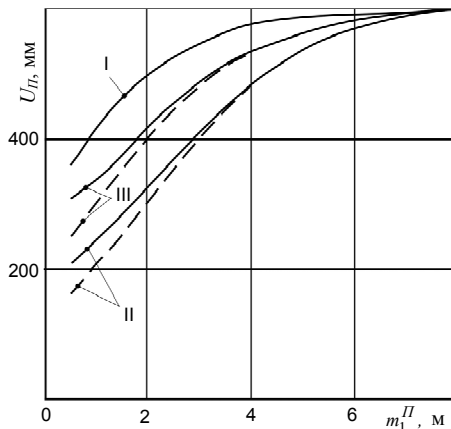


Рис. 7.1. К сравнительному анализу зависимостей $U_{II}(m_1^{\text{II}})$ для трех схем I, II и III развития пучения в пластовой выработке: — с учетом эффекта «отражения» при разрыхлении непосредственной почвы; - - отсутствие разрыхления непосредственной почвы

где $\Phi_I = 1$ – для схемы I;

$$\Phi_{II} = 1 + 0,5 \exp(-1,2m_1^{II}) \text{ – для схемы II};$$

$$\Phi_{III} = 1 + 0,5 \exp(-1,5m_1^{III}) \text{ – для схемы III};$$

K_H – коэффициент, учитывающий влияние глубины H размещения выработки;

K_S – коэффициент влияния типоразмера сечения выработки, определяемый в соответствии с работой [16] в зависимости от площади поперечного сечения S_{ce} в свету до осадки; для наиболее широко применяемых в Западном Донбассе типов крепей КШПУ-9,5...17,7 и КМП-А3 – 9,2...18,3; величины коэффициента изменяются в пределах $K_S = 0,74...1,23$ и определяются по табл. 3.7 [16].

7.2. СВЯЗЬ ВЕЛИЧИНЫ ПУЧЕНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ С ГЛУБИНОЙ РАЗМЕЩЕНИЯ ВЫРАБОТКИ

Практически все известные исследования процессов пучения почвы выработок и существующие методы прогноза этого явления, включая нормативные документы, указывают на тесную связь параметров U^{II} и H , например:

- в работах [15, 16] рекомендуется параболическая функция $U^{II}(H)$;
- в нормативных документах [64, 65, 81] – нелинейная комбинированная функция $U^{II}(H)$ с увеличением градиента роста U^{II} при возрастании H , которая в качественном плане схожа с предыдущей;
- в современном руководящем документе [66] используется линейная связь U^{II} и H .

В настоящих исследованиях установленная зависимость (7.2) получена при глубине размещения выработки $H = 400$ м. Но, ранее была отмечена особенность моделирования процессов пучения по полной диаграмме деформирования породы (с учетом ее разупрочнения и разрыхления), характеризующаяся тем, что в процессе расчетов глубина H размещения выработки является переменным параметром и достаточно было фиксировать величину U^{II} при конкретных значениях текущего параметра H в пределах одного и того же расчетного варианта, что и было осуществлено в ходе исследований. Здесь использован известный методический прием введения поправочного коэффициента на различную глубину H размещения выработки: при $H = 400$ м $K_H = 1,0$; при $H \neq 400$ м $K_H \neq 1$.

Анализ планов горных работ на шахтах Западного Донбасса на сегодняшний день и ближайшую перспективу позволил обосновать наиболее объективный интервал изменения глубины разработки $200 \text{ м} \leq H \leq 600 \text{ м}$, для которого были проведены соответствующие расчеты. Результаты вы-

числений сведены в табл. 7.1.

Из табл. 7.1 видно, что имеется некоторая нелинейность функции $U^{\Pi}(H)$, которая занимает промежуточное положение между линейной связью [66] и нелинейными зависимостями [15, 16, 64, 65, 81], что косвенно свидетельствует о достоверности установленных закономерностей.

Таблица 7.1

ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА K_H УЧЕТА ГЛУБИНЫ H РАЗМЕЩЕНИЯ ВЫРАБОТКИ

Средняя глубина размещения выработки, H , м	200	250	300	350	400	450	500	550	600
K_H	0,43	0,56	0,7	0,85	1,0	1,14	1,3	1,47	1,65

Таким образом, используя данные табл. 7.1 по формуле (7.2) рассчитывается прогнозируемая величина пучения почвы для соответствующего диапазона глубины H размещения пластовых выработок шахт Западного Донбасса.

7.3. РАЗДЕЛЕНИЕ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПО ХАРАКТЕРУ РАЗВИТИЯ ПУЧЕНИЯ И СТЕПЕНИ УСТОЙЧИВОСТИ ПОРОД ПОЧВЫ

Не менее важной задачей является разграничение горно-геологических условий эксплуатации пластовых выработок по фактору необходимости (или отсутствия таковой) проведения мероприятий по борьбе с пучением пород почвы. Определение областей удовлетворительного состояния почвы выработки базируется на полученных уравнениях регрессии (7.2), а критерием служит верхняя граница условия (6.7), то есть $U_{дон}^{\Pi} \leq 300$ мм в соответствии с современными исследованиями и существующими рекомендациями для пологих пластов Донбасса.

В результате совместного решения уравнений (7.2) и условия (6.7) получена следующая зависимость, определяющая условия удовлетворительного состояния почвы

$$R_1^{\Pi} \geq \left[9,93 \exp(0,8m_1^{\Pi}) \Phi_{I,II,III} K_H K_S - \frac{0,6m_2^{\Pi} R_2^{\Pi} + 0,4m_3^{\Pi} R_3^{\Pi}}{0,6m_2^{\Pi} + 0,4m_3^{\Pi}} \right] \left[\exp(0,8m_1^{\Pi}) - 1 \right]^{-1}. \quad (7.3)$$

По формуле (7.3) для анализа установленных закономерностей выполнен пример вычислений минимальной величины расчетного сопротивления сжатию R_1^{Π} непосредственной почвы в зависимости от ее мощности m_1^{Π}

для следующих исходных данных:

- схема I: $R_{2,3}^{II} = 5$ МПа, $m_{2,3}^{II} = 3$ м;
- схема II: $R_2^{II} = 40$ МПа, $R_3^{II} = 5$ МПа, $m_2^{II} = 3$ м, $m_3^{II} = 3$ м;
- схема III: $R_2^{II} = 40$ МПа, $R_3^{II} = 5$ МПа, $m_2^{II} = 1$ м, $m_3^{II} = 3$ м.

Для схемы I развития пучения наблюдается (рис. 7.2) интенсивный рост требуемой величины R_1^{II} при $m_1^{II} < 2$ м для сохранения почвы в удовлетворительном состоянии. Это обусловлено двумя причинами: во-первых, основная почва представлена слабыми породами ($R_{2,3}^{II} = 5$ МПа), для ограни-

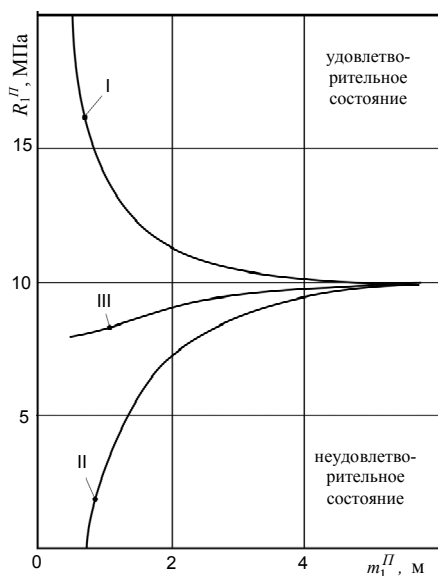


Рис. 7.2. Пример прогноза (по параметрам R_1^{II} и m_1^{II}) области удовлетворительного состояния пород почвы пластовой выработки для трех схем I, II и III развития пучения

обеспечивает удовлетворительное состояние почвы выработки; с увеличением мощности непосредственной почвы повышается расчетное сопротивление сжатию ее породы, величина которого асимптотически приближается к отметке $R_1^{II} = 10$ МПа.

Промежуточное положение занимает схема III развития пучения – здесь маломощный ($m_2^{II} = 1$ м) песчаник ограничивает пучение, но даже при

ограничения пучения которых требуется достаточно устойчивая непосредственная почва, а с уменьшением мощности m_1^{II} напряжения при ее изгибе увеличиваются и необходима более высокая прочность породы; во-вторых, с уменьшением m_1^{II} слабые породы основной почвы более существенно влияют на проявления пучения в выработке, так как приближаются к ее контуру. При значительной мощности непосредственной почвы ($m_1^{II} > 3$ м) величина R_1^{II} стабилизируется на уровне $R_1^{II} = 10$ МПа, что и обеспечивает удовлетворительное состояние почвы выработки.

Иная картина наблюдается при схеме II развития пучения – здесь при $m_1^{II} \leq 1$ м практически при любой крепости непосредственной почвы достаточно мощный песчаник ($m_2^{II} = 3$ м)

$m_1^{\text{II}} = 0,5$ м для сохранения почвы выработки в удовлетворительном состоянии ее R_1^{II} достигает 7,9 МПа; при увеличении мощности непосредственной почвы ее необходимое сопротивление сжатию возрастает с низким градиентом до стабильной величины $R_1^{\text{II}} = 10$ МПа.

В целом, формула (7.3) для прогноза состояния почвы пластовой выработки вполне логично объясняет разные ситуации проявления пучения в зависимости от структуры и свойств пород непосредственной и основной почвы. Неравенство (7.3) имеет простую форму записи, позволяет в явном виде оперативно произвести вычисления и определиться с необходимостью проведения мероприятий по борьбе с пучением почвы подготовительных выработок.

Заключительная задача в данном подразделе состоит в определении, по какой из схем (I, II или III) будет протекать процесс пучения почвы в конкретных условиях эксплуатации выработки с целью прогноза этого явления и выработки мероприятий по его ограничению. Схема I не нуждается в каких-либо критериях ее выявления, так как характеризуется отсутствием песчаника в почве, которая сложена относительно однородными по механическим свойствам слабыми породами (аргиллит, алевролит). Иная ситуация возникает при разделении схем II и III развития пучения, отличающихся друг от друга только условием целостности или нарушенности песчаника в основной почве. Поэтому, за критерий выявления схемы II или схемы III, по которым прогнозируется развитие процесса пучения, принято условие сохранения целостности песчаника путем определения минимальной его мощности $(m_2^{\text{II}})_{\text{min}}$, при которой нарушений в песчанике не происходит.

Поставленная задача решена на основе корреляционно-дисперсионного анализа результатов моделирования при детальном изучении эпюр всех компонент напряжений в песчанике. Установлено, что наиболее тесная связь минимально допустимой мощности песчаника наблюдается с такими параметрами:

расчетное сопротивление сжатию песчаника R_2^{II} , отношение $\frac{m_1^{\text{II}}}{R_1^{\text{II}}}$ для

непосредственной почвы и отношение $\frac{m_3^{\text{II}}}{R_3^{\text{II}}}$ для слоя основной почвы, располагающегося под песчаником.

Результаты анализа представлены на рис. 7.3, где приведены графики зависимости, разделяющих области сохранения целостности песчаника (схема II) и его нарушенности (схема III). Выявленные закономерности таковы, что с увеличением прочности песчаника R_2^{II} и снижением параметров $\frac{m_{1,3}^{\text{II}}}{R_{1,3}^{\text{II}}}$ (увеличением $R_{1,3}^{\text{II}}$ или уменьшением $m_{1,3}^{\text{II}}$) снижается

минимальная мощность песчаника $(m_2^{\text{II}})_{\text{min}}$, при которой он сохраняет целост-

ность. Эти закономерности вполне логичны и объяснимы с точки зрения геомеханики процесса развития пучения: чем выше крепость пород, тем менее интенсивно пучение; чем меньше мощности $m_{1,3}^{\text{II}}$ наиболее слабых породных слоев, тем меньший объем разупрочненных пород участвует в процессе пучения и легче его ограничить более крепким песчаником. Так,

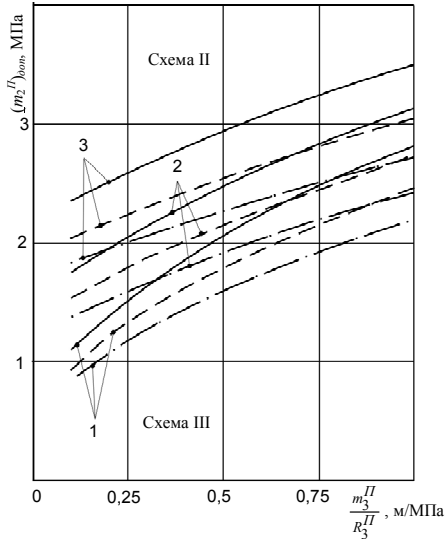


Рис. 7.3. Разделение условий развития пучения выработки по схемам II или III:

- 1 - $\frac{m_1^{\text{II}}}{R_1^{\text{II}}} = 0,1$ м/МПа; 2 - $\frac{m_1^{\text{II}}}{R_1^{\text{II}}} = 0,5$ м/МПа;
 3 - $\frac{m_1^{\text{II}}}{R_1^{\text{II}}} = 1$ м/МПа; — $R_2^{\text{II}} = 30$ МПа,
 -- $R_2^{\text{II}} = 40$ МПа, - · - $R_2^{\text{II}} = 50$ МПа

при $\frac{m_{1,3}^{\text{II}}}{R_{1,3}^{\text{II}}} = 0,1$ м/МПа в интервале

$R_2^{\text{II}} = 30 \dots 50$ МПа сохранение целостности песчаника достигается при его мощности $(m_2^{\text{II}})_{\text{min}} = 0,85 \dots 1,1$ м; с увеличением мощности $m_{1,3}^{\text{II}}$ и снижением

сопротивления сжатию $R_{1,3}^{\text{II}}$ наиболее слабых слоев нагрузка на песчаник возрастает и при увеличении минимальной мощности песчаника до $(m_2^{\text{II}})_{\text{min}} = 2,69 \dots 3,48$ м его разрушение предотвращается.

Помимо графической иллюстрации критерия разделения схем II или III развития пучения на основе корреляционно-дисперсионного анализа получено уравнение регрессии, определяющее минимальную величину мощности песчаника, при которой он сохраняет свою целостность (схема II)

$$(m_2^{\text{II}})_{\text{min}} \geq 3,6 \sqrt{\frac{1}{R_2^{\text{II}}} \left(11 \frac{m_1^{\text{II}}}{R_1^{\text{II}}} + 17 \frac{m_3^{\text{II}}}{R_3^{\text{II}}} \right)}, \text{ м.} \quad (7.4)$$

Таким образом, определены все основные закономерности для создания методики прогноза проявлений пучения пород почвы в подготовительных выработках шахт Западного Донбасса.

8. МЕТОД ПРОГНОЗА И МОНИТОРИНГ ПОЧВЫ ПЛАСТОВЫХ ВЫРАБОТОК ШАХТ ЗАПАДНОГО ДОНБАССА

8.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И АЛГОРИТМ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ

Мониторинг состояния почвы по всей протяженности пластовой выработки на базе прогноза величины ее пучения представляет собой актуальную практическую задачу своевременного планирования мероприятий по обеспечению надлежащих норм и выполнению правил безопасного ведения горных работ. Меняющаяся по длине выработки горно-геологическая ситуация ее поддержания требует (помимо прочих условий) предварительной оценки устойчивости почвы и выявления проблемных с этой точки зрения участков. Здесь, помимо традиционной подрывки почвы, возможно предварительное планирование с последующей реализацией мероприятий по повышению устойчивости почвы, в том числе, в период проведения выработки. Например, при слабой непосредственной почве мощностью до 1,5 – 2 м возможно увеличение глубины подрывки для снижения объемов неустойчивых пород, если это позволяют другие технические нормы ее эксплуатации. Также следует изучить целесообразность ограничения водопритока на участках с обводненной почвой, где прогнозируется более интенсивное пучение. Не нужно сбрасывать со счетов проведение мероприятий по упрочнению почвы, усилению стоек рамной крепи и боковых пород анкерами, возведению обратного свода и тому подобное. Все эти технические решения предусматриваются на основе проведения комплекса расчетов величины U^II пучения почвы на каждом из участков выработки, где существенно меняются горно-геологические условия ее поддержания. Расчет величины пучения пород почвы и ее оценка производится в следующей последовательности.

1. На основе горно-геологического прогноза выработка разделяется на участки с существенно разными условиями ее поддержания: изменение структуры пород основной и непосредственной почвы (литотип, мощность слоев, степень обводненности, интенсивность трещиноватости), колебание прочностных характеристик близлежащих породных слоев. Для каждого выделенного участка составляются исходные данные по параметрам: мощность слоя m_i^II , сопротивление сжатию его породы $\sigma_{сж; i}^II$, степень обводненности, интенсивность трещиноватости.

2. Определяется расчетное сопротивление сжатию пород близлежащих трех слоев почвы $R_{1,2,3}^II$ с использованием формулы (6.1), табл. 6.2 и 6.3.

3. Производится предварительная оценка состояния почвы по условию: при расчетном сопротивлении сжатию пород всех трех близлежащих слоев не менее 10 МПа почва достаточно устойчива и не требуется каких-либо меро-

приятый по борьбе с пучением; при невыполнении условия $R_i^{\text{II}} \geq 10$ МПа хотя бы по одному из трех близлежащих слоев почвы производится дальнейшая оценка ее состояния.

4. На основании данных по структуре основной почвы определяется схема развития пучения:

- схема I – отсутствие песчаника в близлежащих слоях основной почвы;
- схема II, III – наличие песчаника в близлежащих слоях основной почвы.

Выбор схемы II или схемы III производится по условию (7.4) путем сравнения граничного значения $(m_2^{\text{II}})_{\text{дон}}$ с реальной величиной мощности песчаника.

5. Производится окончательная оценка степени устойчивости почвы по выражению (7.3): при значении R_1^{II} не менее рассчитанного по формуле (7.3) состояние пород почвы удовлетворительное; при невыполнении условия (7.3) требуется проведение соответствующих мероприятий по обеспечению устойчивости пород почвы пластовой выработки.

6. Рассчитывается прогнозная величина U^{II} поднятия почвы по формуле (7.2) для конкретизации мероприятий по борьбе с пучением; например, определяются объемы работ по подрывке почвы.

Разработанный алгоритм оценки состояния пород почвы рекомендуется использовать в сочетании с действующим нормативным документом [66] по выбору крепи горных выработок для принятия комплексных технических решений по их эффективному и безопасному поддержанию.

8.2. ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТОВ

В разработанном методе прогноза пучения пород почвы пластовых выработок используются следующие геомеханические и горнотехнические параметры:

- расчетная глубина H размещения выработки;
- мощность $m_{1,2,3}^{\text{II}}$ и расчетное сопротивление сжатию $R_{1,2,3}^{\text{II}}$ трех близлежащих слоев непосредственной и основной почвы угольного пласта;
- площадь поперечного сечения выработки $S_{\text{св}}$ в свету до осадки.

Формирование исходных данных для прогноза состояния пород почвы пластовой выработки осуществляется на основе информации по геологическим изысканиям (горно-геологическому прогнозу) для конкретной выработки, технической документации на ее сооружение с использованием основных положений нормативного документа [66] и результатов исследований [16].

Расчетная глубина размещения выработки H определяется по формуле

$$H = H_{\text{np}} \cdot k, \text{ м}, \quad (8.1)$$

где H – проектная фактическая глубина размещения выработки или ее уча-

стка от дневной поверхности;

k – коэффициент, учитывающий отличие напряженного состояния горного массива от исходного, формируемого собственным весом надугольной толщи до дневной поверхности; для обычных условий вне зоны влияния очистных работ и тектонических нарушений $k = 1$; при поддержании выработок в дизъюнктивных нарушениях или замках складок $k = 1,5$; в зонах повышенного горного давления величина k определяется по заключению УкрНИМИ.

Мощность $m_{1,2,3}^{\Pi}$ трех близлежащих породных слоев непосредственной и основной почвы пласта определяется по данным горно-геологического прогноза условий поддержания конкретной выработки. Поскольку задачей прогнозного мониторинга является оценка состояния пород почвы на всей протяженности выработки, то ее длина разбивается на участки с относительно выдержанной структурой пород почвы. При замещении литологических разностей (изменение структуры пород почвы) хотя бы по одному из трех слоев $m_{1,2,3}^{\Pi}$, данный участок выделяется в самостоятельный для проведения отдельного расчета ожидаемой величины пучения пород почвы.

Расчетное сопротивление сжатию $R_{1,2,3}^{\Pi}$ пород трех близлежащих слоев непосредственной и основной почвы определяется по формуле (6.1) с использованием табл. 6.2 и 6.3. В формуле (6.1) предел прочности пород на одноосное сжатие в образце $\sigma_{сж1,2,3}^{\Pi}$ выбирается по данным горно-геологического прогноза. С точки зрения выполнения задач мониторинга состояния пород почвы выработки она разбивается на дополнительные участки (к уже имеющимся по параметрам $m_{1,2,3}^{\Pi}$), где прогнозируется резкое (более 30%) изменение интенсивности трещиноватости, либо обводнение пород почвы.

Площадь поперечного сечения выработки $S_{св}$ в свету до осадки определяется по технической документации на сооружение конкретной выработки. При изменении $S_{св}$ по ее длине эти участки подлежат дополнительному расчету в ходе выполнения прогнозного мониторинга состояния пород почвы. Коэффициент k_S влияния типоразмера сечения выработки определяется согласно исследованиям [16] по табл. 8.1.

Таблица 8.1

ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА k_S ВЛИЯНИЯ ТИПОРАЗМЕРА СЕЧЕНИЯ ВЫРАБОТКИ

Вид крепи	Площадь поперечного сечения в свету до осадки $S_{св}$, м ²					
$\frac{КМП - АЗ}{k_S}$	$\frac{9,2}{0,74}$	$\frac{11,2}{0,86}$	$\frac{13,8}{1,00}$	$\frac{15,5}{1,09}$	$\frac{18,3}{1,23}$	
$\frac{КШПУ}{k_S}$	$\frac{9,5}{0,76}$	$\frac{10,5}{0,82}$	$\frac{11,7}{0,89}$	$\frac{12,1}{0,91}$	$\frac{14,4}{1,03}$	$\frac{17,7}{1,20}$

8.3. ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ И ПРОГНОЗ ВЕЛИЧИНЫ ЕЕ ПУЧЕНИЯ

В соответствии с алгоритмом проведения расчетов по §8.1 вычисления производятся в следующей последовательности.

1. Выработка разбивается на участки с существенно различной структурой и свойствами пород непосредственной и основной почвы; осуществляется предварительный выбор участков, на которых возможно неудовлетворительное состояние пород почвы вне зависимости от ее структуры: при расчетном сопротивлении сжатию менее 10 МПа хотя бы одного из трех близлежащих породных слоев непосредственной и основной почвы следует выполнить процедуру вычислений по прогнозу величины пучения.

2. Производится выбор схемы развития пучения пород почвы в зависимости от ее структуры по §8.1. При отсутствии песчаника в трех близлежащих породных слоях почвы особенности развития пучения отражает схема I. При наличии песчаника в трех близлежащих породных слоях почвы ее поведение описывается схемами II и III развития пучения. Для разделения схем II и III используется критерий (7.4), определяющий граничное значение мощности $(m_2^{II})_{min}$ второго слоя, представленного песчаником. Сравниваются мощность m_2^{II} песчаника на данном участке длины выработки и величина $(m_2^{II})_{min}$, вычисленная по формуле (7.4). При $m_2^{II} \geq (m_2^{II})_{min}$ песчаник сохраняет свою целостность и процесс пучения развивается по схеме II развития пучения; при $m_2^{II} < (m_2^{II})_{min}$ песчаник разбивается на блоки с образованием распорной системы, – развитие пучения происходит по схеме III.

3. На рассматриваемом участке выработки производится проверка состояния почвы выработки на пригодность к эксплуатации по условию не превышения прогнозируемой величины пучения U^{II} допустимого значения 300 мм. Критерием оценки служит условие (7.3): если расчетное значение сопротивления сжатию непосредственной почвы R_1^{II} превышает вычисленное по формуле (7.3), то прогнозируемая величина пучения не превышает допустимых норм эксплуатации выработки; в противном случае необходимо проведение мероприятий по ограничению величины пучения или ликвидации его последствий.

4. Для обоснования мероприятий по борьбе с пучением пород почвы производится расчет его прогнозируемой величины U^{II} по формуле (7.2). Вычисления выполняются по каждому из участков длины выработки, где прогнозируется неудовлетворительное состояние пород почвы по п. 3 настоящего подраздела. Конечный результат мониторинга представляется в виде перечня участков выработки с неудовлетворительным состоянием почвы, в котором фиксируется длина участка и прогнозируемая величина U^{II} пуче-

ния. По этим показателям определяются виды и рассчитываются объемы ремонтно-восстановительных работ по обеспечению устойчивости пород почвы пластовой выработки.

8.4. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОГНОЗНОГО РАСЧЕТА ПУЧЕНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ

1. *Исходные данные.* Планируется сооружение конвейерного штрека сечением в свету до осадки $S_{сб} = 11,7 \text{ м}^2$ под рамную крепь КШПУ-11,7. Штрек проводится по восстанию угольного пласта (со средним углом падения $3,5^\circ$) вне зон тектонических нарушений на глубине $H_{np} = 340...490 \text{ м}$. Структура и свойства близлежащих породных слоев почвы конвейерного штрека характеризуются следующими параметрами.

Непосредственная почва представлена преимущественно аргиллитом мощностью $m_1^{\text{II}} = 0,5...2,7 \text{ м}$ со средним значением сопротивления сжатию в образце $\sigma_{сж1}^{\text{II}} = 18,2 \text{ МПа}$; интенсивность трещиноватости – 5 – 8 трещин на п.м; на участках между ПК0 – ПК12, ПК48 – ПК71, ПК106 – ПК112 породы непосредственной почвы обводнены. На участке ПК72 – ПК105 прогнозируется замещение аргиллита алевролитом мощностью $m_1^{\text{II}} = 1,8...3,3 \text{ м}$, $\sigma_{сж1}^{\text{II}} = 20,6 \text{ МПа}$; породы нетрещиноватые, необводненные.

Основная почва. К расчету приняты параметры строения и свойств двух близлежащих к выработке породных слоев мощностью $m_{2,3}^{\text{II}}$ и сопротивлением сжатию в образце $\sigma_{сж2,3}^{\text{II}}$. Второй (относительно почвы выработки) породный слой представлен алевролитом мощностью $m_2^{\text{II}} = 2,1...5,7 \text{ м}$, $\sigma_{сж2}^{\text{II}} = 20,6 \text{ МПа}$ с замещением на участке ПК48 – ПК112 песчаником мощностью $m_2^{\text{II}} = 0,9...4,3 \text{ м}$, $\sigma_{сж2}^{\text{II}} = 41,0 \text{ МПа}$. Оба литотипа нетрещиноватые, а их обводненность прогнозируется на участках между ПК0 – ПК12, ПК48 – ПК71, ПК106 – ПК112. Третий породный слой представлен нетрещиноватым аргиллитом мощностью $m_3^{\text{II}} = 2,6...6,7 \text{ м}$, $\sigma_{сж3}^{\text{II}} = 14,5 \text{ МПа}$. На участках между ПК0 – ПК12, ПК48 – ПК71 и ПК106 – ПК112 аргиллит обводнен.

Определяем расчетную глубину размещения выработки в соответствии с формулой (8.1). Поскольку по условиям примера конвейерный штрек размещен вне зоны тектонических нарушений, то принимаем $k = 1$ и расчетная глубина H совпадает с проектной H_{np}

$$H = H_{np} \cdot 1 = 340 \dots 490 \text{ м.}$$

Вычисляем расчетное значение сопротивления сжатию $R_{1,2,3}^{II}$ трех близлежащих слоев непосредственной и основной почвы с учетом действия ослабляющих породу факторов в соответствии с формулой (6.1), табл. 6.2 и 6.3.

$$R_i = K_c K_w K_t \sigma_{сжi}^{II} \quad (i = 1, 2, 3).$$

Для удобства вычислений и системности последующего прогноза результаты сведены в табл. 8.2 по выделенным участкам длины выработки. Участки разделены по двум факторам: замещение литологических разностей и степень обводненности. Всего выделено 6 участков, для каждого из которых по каждой литологической разности определены значения коэффициентов K_c , K_w , K_t ослабления.

Таблица 8.2

ПРИМЕР РАЗБИВКИ ВЫРАБОТКИ НА УЧАСТКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТА ПУЧЕНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ

№ п/п	Но-мер ли-кета	Номер слоя почвы											
		1			R_1^{II} , МПа	2			R_2^{II} , МПа	3			R_3^{II} , МПа
		Ослабляющие факторы				Ослабляющие факторы				Ослабляющие факторы			
K_c	K_w	K_t		K_c	K_w	K_t		K_c	K_w	K_t			
1	ПК0 – ПК12	аргиллит			2,91	алевролит			8,90	аргиллит			5,22
		0,4	0,5	0,8		0,9	0,6	0,8		0,9	0,5	0,8	
2	ПК13 – ПК47	аргиллит			5,82	алевролит			14,83	аргиллит			10,44
		0,4	1,0	0,8		0,9	1,0	0,8		0,9	1,0	0,8	
3	ПК48 – ПК71	аргиллит			2,91	песчаник			26,57	аргиллит			5,22
		0,4	0,5	0,8		0,9	0,8	0,9		0,9	0,5	0,8	
4	ПК72 – ПК105	аргиллит			14,83	песчаник			33,21	аргиллит			10,44
		0,9	1,0	0,8		0,9	1,0	0,9		0,9	1,0	0,8	
5	ПК106 – ПК112	аргиллит			2,91	песчаник			26,57	аргиллит			5,22
		0,4	0,5	0,8		0,9	0,8	0,9		0,9	0,5	0,8	
6	ПК113 – ПК123	аргиллит			5,82	алевролит			14,83	аргиллит			10,44
		0,4	1,0	0,8		0,9	1,0	0,8		0,9	1,0	0,8	

Глубина размещения выработки ($H = H_{np}$) определяется по плану горных работ для каждого из выделенных участков выработки. По значениям

H определяется средняя величина коэффициента K_H (см. табл. 7.1) влияния глубины; результаты сведены в табл. 8.3.

Коэффициент k_S влияния типоразмера сечения выработки определяем по табл. 8.1. Для сечения под крепь КШПУ-11,7 величина $k_S = 0,89$.

Таким образом, полностью сформирована база исходных данных для выполнения прогнозного расчета пучения пород почвы конвейерного штрека.

Таблица 8.3

СРЕДНИЕ ПО УЧАСТКАМ ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА K_H

Номер пикета	ПК0 – ПК12	ПК13 – ПК47	ПК48 – ПК71	ПК72 – ПК105	ПК106 – ПК112	ПК113 – ПК123
K_H	1,24	1,15	1,05	0,95	0,87	0,84

2. Производим предварительную оценку устойчивости пород почвы по величинам расчетного сопротивления $R_{1,2,3}^{II}$ сжатию трех близлежащих слоев: при $R_{1,2,3}^{II} \geq 10$ МПа породы почвы находятся в устойчивом состоянии. Из выделенных шести участков предварительному условию устойчивости удовлетворяет только один – от ПК72 до ПК105; остальные пять участков требуют дальнейшего проведения прогнозной оценки.

3. Устанавливаем схему развития пучения пород почвы выработки на каждом из выделенных пяти участков в зависимости от структуры непосредственной и основной почвы.

На трех участках между ПК0 – ПК12, ПК13 – ПК47 и ПК113 – ПК123 близлежащие к выработке три породных слоя представлены аргиллитом и алевролитом с достаточно схожими механическими свойствами, то есть, структуру почвы можно охарактеризовать как относительно однородную. Поэтому, указанные участки подпадают под схему I развития пучения пород почвы.

На остальных двух участках (ПК48 – ПК71 и ПК106 – ПК112) во втором породном слое присутствует песчаник, механические свойства которого существенно отличаются по сравнению с аргиллитом и алевролитом. Здесь развитие пучения пород почвы происходит по схеме II или III. Для выбора той или иной схемы используем условие (4.11) с исходными данными по табл. 8.2 и 8.3. Интервалы изменения мощностей m_i^{II} породных слоев для каждого участка длины выработки установлены по данным горно-геологического прогноза и приведены в табл. 8.4. Здесь же приведена строка с расчетными значениями параметров m_i^{II} (используемыми во всех вычислениях), которые выбираются из вышеприведенного интервала изменения m_i^{II} по следующим правилам. Исследованиями установлено, что наиболее интенсивное пучение пород почвы наблюдается при сочетании мини-

мальной мощности наиболее крепкого слоя и максимальных мощностей менее крепких слоев. Поэтому, для более крепкого песчаника за расчетную мощность m_2^{II} выбрано ее минимальное значение на каждом участке длины выработки; для аргиллита и алевролита $m_{1,3}^{\text{II}}$ использованы максимальные значения в пределах конкретных диапазонов изменения.

Таблица 8.4

СВЕДЕНИЯ ПО ДИАПАЗОНАМ ИЗМЕНЕНИЯ И ВЕЛИЧИНАМ РАСЧЕТНОЙ МОЩНОСТИ $m_{1,2,3}^{\text{II}}$ СЛОЕВ ПОРОД ПОЧВЫ ПО УЧАСТКАМ ВЫРАБОТКИ

Номер пикета		ПК0 – ПК-12	ПК13 – ПК47	ПК48 – ПК71	ПК106 – ПК112	ПК113 – ПК123
Интервал мощности, м	m_1^{II}	2,3 – 2,7	0,6 – 2,3	0,6 – 2,5	0,5 – 0,7	0,7 – 1,1
	m_2^{II}	2,5 – 3,2	3,2 – 5,7	3,6 – 4,3	0,9 – 1,5	2,1 – 2,8
	m_3^{II}	3,1 – 4,4	2,6 – 4,4	2,6 – 3,9	5,0 – 6,7	4,9 – 6,7
Расчетная мощность, м	m_1^{II}	2,7	2,3	2,5	0,7	1,1
	m_2^{II}	2,5	3,2	3,6	0,9	2,1
	m_3^{II}	4,4	4,4	3,9	6,7	6,7

Согласно условию (7.4) устанавливаем схему развития пучения пород почвы по участкам длины выработки.

ПК48 – ПК71:

$$\left(m_2^{\text{II}}\right)_{\min} \geq 3,6 \sqrt{\frac{1}{R_2^{\text{II}}} \left(11 \frac{m_1^{\text{II}}}{R_1^{\text{II}}} + 17 \frac{m_3^{\text{II}}}{R_3^{\text{II}}} \right)};$$

$$3,6 \text{ м} \geq 3,6 \sqrt{\frac{1}{26,57} \left(11 \frac{2,5}{2,91} + 17 \frac{3,9}{5,22} \right)} = 3,29 \text{ м};$$

3,6 м > 3,29 м – условие целостности песчаника выполняется; следовательно, развитие пучения пород почвы происходит по схеме II.

ПК106 – ПК112:

$$0,9 \text{ м} \geq 3,6 \sqrt{\frac{1}{26,57} \left(11 \frac{0,7}{2,91} + 17 \frac{6,7}{5,22} \right)} = 3,45 \text{ м};$$

0,9 м < 3,45 м – условие целостности песчаника не выполняется, – развитие пучения пород почвы происходит по схеме III.

В итоге, по каждому из пяти «проблемных» участков длины выработки установлена своя схема развития пучения пород почвы.

4. Производим проверку состояния пород почвы на пригодность к эксплуатации выработки по условию (7.3) ограниченного пучения, не превышающего допустимую величину 300 мм.

ПКО – ПК12:

$$R_1^{\text{II}} \geq \left[9,93 \exp(0,8m_1^{\text{II}}) \Phi_{\text{I,II,III}} K_H K_S - \frac{0,6m_2^{\text{II}} R_2^{\text{II}} + 0,4m_3^{\text{II}} R_3^{\text{II}}}{0,6m_2^{\text{II}} + 0,4m_3^{\text{II}}} \right] \left[\exp(0,8m_1^{\text{II}}) - 1 \right]^{-1};$$

$$\Phi_{\text{I}} = 1 \text{ для схемы I, } \Phi_{\text{II}} = 1 + 0,5 \exp(-1,2m_1^{\text{II}}) \text{ для схемы II}$$

и $\Phi_{\text{III}} = 1 + 0,5 \exp(-1,5m_1^{\text{II}})$ для схемы III развития пучения пород почвы.

$$2,91 \geq \left[9,93 \exp(0,8 \cdot 2,7) 1 \cdot 1,24 \cdot 0,89 - \frac{0,6 \cdot 2,5 \cdot 8,90 + 0,4 \cdot 4,4 \cdot 5,22}{0,6 \cdot 2,5 + 0,4 \cdot 4,4} \right] \times \\ \times \left[\exp(0,8 \cdot 2,7) - 1 \right]^{-1} = 11,49;$$

2,91 МПа < 11,49 МПа – условие допустимой величины сопротивления сжатию пород почвы выработки не выполняется, – на данном участке необходимо произвести прогнозную оценку интенсивности пучения пород почвы и по результатам предусмотреть соответствующие мероприятия по его ограничению.

По изложенному примеру на остальных участках длины выработки получены следующие результаты:

– ПК13 – ПК47, ПК4 – 8ПК71, ПК106 – ПК112 – условие допустимой величины пучения не выполняется и на этих участках необходимо запланировать мероприятия по борьбе с пучением пород почвы;

– ПК113 – ПК123 – условие допустимой величины пучения выполняется ($U^{\text{II}} = 264$ мм); следовательно выработка сохраняет пригодность к эксплуатации без проведения каких-либо дополнительных мероприятий по ограничению пучения пород почвы.

5. Определяем величину пучения U^{II} по формуле

$$U^{\text{II}} = \frac{2980 \Phi_{\text{I,II,III}} K_H K_S}{R_1^{\text{II}} + \left(\frac{0,6m_2^{\text{II}} R_2^{\text{II}} + 0,4m_3^{\text{II}} R_3^{\text{II}}}{0,6m_2^{\text{II}} + 0,4m_3^{\text{II}}} - R_1^{\text{II}} \right) \exp(-0,8m_1^{\text{II}})}.$$

На участке ПКО – ПК12:

$$U^{\text{II}} = \frac{2980 \cdot 1 \cdot 1,24 \cdot 0,89}{2,91 + \left(\frac{0,6 \cdot 2,5 \cdot 8,9 + 0,4 \cdot 4,4 \cdot 5,22}{0,6 \cdot 2,5 + 0,4 \cdot 4,4} - 2,91 \right) \exp(-0,8 \cdot 2,7)} = 976 \text{ мм.}$$

Аналогично вышеприведенному расчету на других участках получены такие результаты:

ПК13 – ПК47: $U^{\text{II}} = 435$ мм;

ПК48 – ПК71: $U^{\text{II}} = 583$ мм;

ПК106 – ПК112: $U^{\text{II}} = 430$ мм.

Таким образом, по результатам мониторинга состояния пород почвы конвейерного штрека выявлено четыре участка, где прогнозируемая величина пучения превышает допустимое значение. Особое внимание необходимо уделить участку между ПК0 – ПК12 с прогнозируемой величиной пучения пород почвы около 1 м.

Подводя итоги проведенным исследованиям можно констатировать выполнение главной цели работы – создание научно обоснованной базы для заблаговременного планирования мероприятий по ограничению негативных последствий пучения пород почвы пластовых выработок.

ВЫВОДЫ

В результате реализации задач исследований разработан метод прогноза пучения пород почвы пластовых выработок, отражающий специфику деформирования близлежащей углевмещающей толщи Западного Донбасса. Основные выводы сводятся к следующему.

1. Приемственность результатов предыдущих исследований позволила развить методику проведения вычислительного эксперимента до уровня, учитывающего действие основных разупрочняющих массив факторов (обводненности, трещиноватости, реологии), при сохранении многовариантности геомеханических расчетов для создания базы данных к установлению многопараметрических зависимостей, характеризующих проявления горного давления в почве пластовых выработок.

2. Проведено всестороннее обоснование закономерностей влияния основных геомеханических факторов (структура и свойства пород, глубина размещения) на проявления пучения пород почвы пластовых выработок. Для каждой из трех установленных схем развития процесса пучения пород получены корреляционные зависимости для расчета величины пучения с достаточно высоким коэффициентом множественной корреляции. Эти зависимости учитывают распределение мощности и сопротивления сжатию породных слоев по глубине непосредственной и основной почвы, но отличаются простотой и доступностью использования при прогнозировании пучения почвы при разных вариантах схем его развития. Разделение горно-

геологических условий по характеру развития пучения пород доведено до критериального уравнения, позволяющего численно определить схему протекания процесса.

3. Доказано, что при величине расчетного значения сопротивления сжатию $R_i^{II} \geq 10$ МПа пород всех трех близлежащих слоев почвы по глубине не менее 6 м породы достаточно устойчивы, а ограниченная величина пучения (до 200 – 300 мм) не оказывает существенного влияния на эксплуатационные характеристики выработки в целом. Установлены границы областей удовлетворительного и неустойчивого состояния пород почвы и получено критериальное уравнение для разделения этих областей, что позволяет уже на стадии проектирования определить проблемные участки по длине выработки и обосновать мероприятия по ограничению или ликвидации негативного влияния пучения пород почвы.

4. По итогам исследований разработан метод и алгоритм проведения прогноза пучения пород почвы пластовых выработок шахт Западного Донбасса, позволяющие оперативно оценить ее состояние и выработать технические решения по обеспечению надлежащих эксплуатационных параметров выработки в целом. Поэтому предлагаемый метод прогноза рекомендуется использовать как дополнение к действующим нормативным документам по поддержанию горных выработок и на его основе осуществлять прогнозный мониторинг геомеханического явления пучения пород почвы, чрезвычайно актуального для условий шахт Западного Донбасса.

9. ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ВМЕЩАЮЩЕГО МАССИВА И ПРИКОНТУРНЫХ ПОРОД КОНВЕЙЕРНОГО ШТРЕКА ПЛАСТА m_4^0 ШАХТЫ «БЕЛИЦКАЯ»

9.1. ПОСТРОЕНИЕ, ОБОСНОВАНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОНВЕЙЕРНОГО ШТРЕКА

Угольный пласт m_4^0 в пределах исследуемого участка шахтного поля имеет как простое, так и сложное (двухпачечное) строение. Верхняя и нижняя пачки разделены углистым сланцем мощностью 0,02 м, который на отдельных участках появляется в кровле пласта мощностью до 0,32 м. Общая мощность пласта изменяется в интервале 0,72 – 1,09 м. Уголь тонкослоистый и трещиноватый (расстояние между трещинами 0,5 – 2 см) с коэффициентом крепости по шкале проф. М.М. Протодюконова $f = 1,5$. Угольный пласт увлажнен, что представляет собой определенную опасность для размокания пород непосредственной почвы конвейерного штрека, представленной аргиллитом и алевролитом. Интенсивная трещиноватость угольного пласта в сочетании с низким сопротивлением сжатию позволяет сделать вывод о его разупрочнении в краевых частях на значительное расстояние в глубь массива. С точки зрения формирования зон опорного давления в краевых частях пласта m_4^0 , то есть существующие представления [58, 89, 112 – 114] о процессах сдвижения надугольной толщи указывают на следующие качественные особенности:

– *во-первых*, зоны повышенного горного давления (ПГД) имеет более глубокое распространение в массив, поэтому область влияния очистных работ будет затрагивать более удаленные участки конвейерного штрека впереди лавы; на участке поддержания штрека позади лавы – боковая зона ПГД со стороны смежного выемочного участка прогнозируется также повышенного удаления в глубь нетронутого массива;

– *во-вторых*, максимальная концентрация горного давления в отмеченных зонах ПГД прогнозируется пониженной величины из-за интенсивного разупрочнения краевых частей угольного пласта, на которые накладываются и его невысокие деформационные характеристики.

В кровле пласта m_4^0 залегают следующие литологические разности. Ложная кровля, представленная углистым сланцем, появляется эпизодически в первой половине длины выемочного участка максимальной мощностью до 0,32 м. Механические характеристики углистого сланца близки к свойствам пласта m_4^0 , сцепление по плоскостям напластования практически отсутству-

ет; так что углистый сланец обрушается сразу после его обнажения.

Выше залегает песчаник мощностью 7,4 – 14,0 м (в пределах проектной длины конвейерного штрека), что не позволяет четко разделить кровлю на непосредственную и основную. Песчаник среднезернистый с включением углистого материала, слабосцементирован глинистым цементом, обводненный, средней крепости $f = 5,5 \dots 6$, при насыщении водой становится рассыпчатым. На участках, примыкающих к скважинам НД-4876 и НД-4634, не наблюдается слоистости песчаника в пределах мощности 9,2 – 9,65 м; по другим скважинам в нижней части песчаника появляется отдельный его слой мощностью 3,2 – 4,6 м. Этот слой частично выполняет функции непосредственной кровли, отделяясь от основной и обрушаясь в выработанное пространство в первую очередь после прохода лавы. Такое же отслоение будет происходить и на других участках отсутствия слоистости песчаника, так как он обводнен, а глинистый цемент существенно теряет сопротивление отрыву.

Мощность обрушающихся пород $h_{об}$ можно оценить из условия образования подпора опусканию вышележащих слоев по формуле [58]

$$h_{об} = \frac{m - h_c}{k_p - 1}, \quad (9.1)$$

где m – вынимаемая мощность пласта, $m = 0,97$ м;

h_c – свободное опускание слоев кровли без обрушения, для пологих пластов Донбасса прогнозируется $h_c = (0,5 \dots 0,6)m$;

k_p – коэффициент разрыхления песчаника; для пластов мощностью 1 м рекомендуется принимать $k_p = 1,3 \dots 1,4$.

Тогда по формуле (9.1) получаем результат

$$h_{об} = 0,97 \dots 1,62 \text{ м.}$$

Для образования рассчитанной мощности зоны беспорядочного обрушения необходимо разрушение песчаника на высоту $h_{несч}$

$$h_{несч} = h_{об} - (0,4 \dots 0,5)m = 0,58 \dots 1,13 \text{ м.} \quad (9.2)$$

Указанные параметры заложены в геомеханическую модель деформирования конвейерного штрека со стороны выработанного пространства.

Таким образом, нижняя часть песчаника указанной мощности выполняет функции непосредственной кровли; остальная, большая мощность песчаника, представляет собой основную кровлю, которая разбивается трещинами (образуемыми при прогибе в выработанное пространство) на породные блоки и в современных представлениях о сдвигении надугольной толщи ее называют зоной шарнирно-блокового сдвигения. Мощность этой зоны на пологих пластах Донбасса оценивают до 12 – 15 вынимаемых мощностей

угольного пласта, то есть 11,6 – 14,6 м, что в достаточной мере соответствует колебаниям мощности песчаника вдоль конвейерного штрека. На участках пониженной мощности возможно попадание в зону шарнирно-блокового сдвижения также части залегающего выше алевролита; это может произойти на участках в районе скважин НД-4876 (мощность алевролита 3,0 и 0,14 м выше пласта m_4^1) и НД-4634 (мощность алевролита 0,7 и 0,24 м выше пласта m_4^1). Здесь относительно небольшая мощность алевролита крепостью $f = 4$ отделена от вышележащей толщи весьма тонким угольным пластом m_4^1 , который предположительно по горно-геологическому прогнозу увлажнен и имеет слабое сцепление с боковыми породами. По этой причине пласт m_4^1 будет провоцировать расслоение массива по своим плоскостям напластования. На других участках по длине штрека и на отмеченных участках выше пласта m_4^1 прогнозируется плавный изгиб слоев без нарушения сплошности; этому также способствует пониженный модуль деформации алевролита (в сравнении с песчаником), позволяющий опускаться его слоям в целостном состоянии на породные блоки зоны шарнирно-блокового сдвижения.

Таковы основные прогнозируемые особенности процесса сдвижения и структуры надугольной толщи в выработанном пространстве после прохода очистного забоя.

Почва пласта m_4^0 представлена в основном алевролитом мощностью 2,1 – 10,5 м и крепостью $f = 4$ с частичным замещением песчаником мощностью 0 – 2,0 м и крепостью $f = 6...7$, а также аргиллитом мощностью 0 – 3,5 м и крепостью $f = 4$, близким по свойствам к алевролиту. По большей длине конвейерного штрека (скважины НД-4875, НД-4634, НД-4633) непосредственная почва представлена алевролитом мощностью 0,9 – 2,1 м, ниже которого залегают песчаник мощностью 1,2 – 2,0 м. Относительно небольшая мощность двух породных слоев непосредственной почвы усугубляется увлажненностью пласта m_4^0 и обводненностью нижележащего песчаника, что существенно ослабляет их прочностные свойства и создает предпосылки к развитию пучения почвы штрека, особенно после прохода лавы.

Основная почва пласта m_4^0 , представленная слоями алевролита и аргиллита с коэффициентом крепости $f = 4$, прогнозируется достаточно устойчивого состояния по причинам залегания мощных слоев и отсутствия сколь-нибудь существенных водоносных горизонтов.

В целом, учитывая глубину H размещения конвейерного штрека от 172 м в конце выемочного участка до 237 м в его начале, прогнозируются умеренные проявления горного давления, а следовательно, может быть успешно применен вариант бесцеликовой его охраны на границе с выработанным

ным пространством, как более прогрессивный при отработке коренной лавы с применением сплошной системы разработки и повторным использованием штрека.

Главный критерий выбора базового участка штрека для модели предусматривает наиболее сложные горно-геологические условия его поддержания в плане интенсивности проявлений горного давления. Предположительно более активное горное давление будет развиваться на максимальной глубине размещения штрека и при залегании в кровле более слабых пород алевролита и аргиллита повышенной мощности и более крепкого песчаника пониженной мощности. По этим условиям проанализированы данные геологических изысканий с использованием горно-геологического прогноза вдоль конвейерного штрека и сводной литологической колонки, представленных геологической службой шахты «Белицкая». Максимальная глубина конвейерного штрека зафиксирована на участке между скважинами НД-4870 и НД-4876, которая составляет $H = 244$ м. На этом участке в кровле залегает песчаник мощностью 9,65 – 10,2 м; выше размещен алевролит мощностью 3,0 – 19,4 м, который в р-не скважины НД-4876 частично замещается песчаником мощностью до 3,3 м. Но в районе максимальной глубины расположения конвейерного штрека указанный песчаник вырождается и второй слой кровли представлен исключительно алевролитом, если пренебречь пластом m_4^1 мощностью всего 0,16 м. Очевидно, рассматриваемый участок конвейерного штрека будет характеризоваться наиболее интенсивным проявлением горного давления по горно-геологическому фактору, а по горнотехническому фактору здесь следует ожидать первичной посадки основной кровли, что также провоцирует повышенное горное давление. Поэтому для расчета НДС в приконтурных породах выбран указанный участок штрека и, если будет обеспечена его устойчивость, то на других участках, более благоприятных с точки зрения проявлений горного давления, устойчивость штрека будет более высокой.

Модель структуры близлежащего породного массива в окрестности конвейерного штрека северной коренной лавы пласта m_4^0 приведена на рис. 9.1 и включает следующие литологические разности в порядке увеличения глубины их расположения: алевролит мощностью 8,0 м, который в зоне влия-

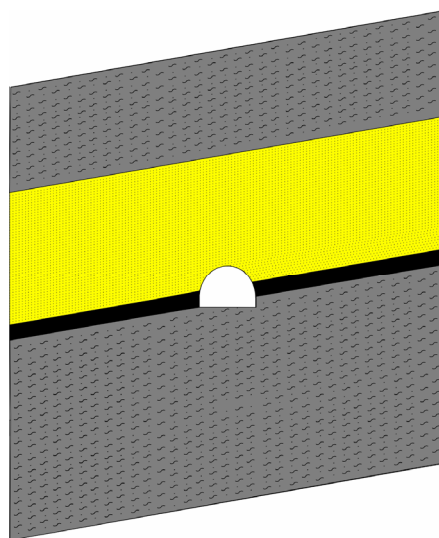


Рис. 9.1. Модель структуры углеводящей толщи пласта m_4^0 на базовом участке конвейерного штрека

ния очистных работ, и особенно после прохода лавы, расслаивается на несколько слоев; песчаник мощностью 10,0 м, который, предположительно, также подвержен расслоению, а в выработанном пространстве разделению на породные блоки; угольный пласт m_4^0 вынимаемой мощности 0,97 м; породы почвы представлены единым слоем алевролита мощностью 15,0 м. Тогда в целом высота модели (по вертикальной координате Y) углевмещающей толщи составила около 34 м. Ширину модели (по горизонтальной координате X) принимаем 60 м из соображений, чтобы граничные условия ее нагружения по боковым граням не влияли на НДС системы вблизи конвейерного штрека; при этом в сторону падения пласта расстояние от штрека принято 15 м, в сторону восстания 40 м, так как здесь будет моделироваться прогиб и обрушение в выработанное пространство породных слоев надугольной толщи.

Конвейерный штрек в соответствии с паспортом проведения проводится с подрывкой почвы со стороны восстания на глубину 0,9 м, со стороны падения почва угольного пласта совмещается с почвой выработки, что объективно отражено в модели. Глубина расположения верхней плоскости алевролита второго слоя кровли (верхняя граница модели) составляет $H = 225$ м.

Условия на границах модели. Верхняя горизонтальная плоскость модели имеет отметку 225 м, что при средневзвешенном объемном весе пород $\gamma = 25$ кН/м³ формирует вертикальную нагрузку на верхней границе модели $\sigma_y = \gamma H = 5,63$ МПа, которая принята в расчетах. Нижняя граница модели имеет жесткую опору и служит плоскостью начала отсчета вертикальной координаты Y . По боковым плоскостям модели введено условие плоской деформации, что отвечает реальному механизму деформирования массива и широко используется в механике подземных сооружений [67, 68, 115, 116]. Согласно этому условию в нетронутом массиве действуют горизонтальные сжимающие напряжения

$$\sigma_x = \lambda \gamma H = \frac{\mu}{1 - \mu} \gamma H, \quad (9.3)$$

где μ – коэффициент Пуассона рассматриваемого породного слоя или пласта угля.

Помещая в базу данных сведения о механических характеристиках углевмещающей толщи (в том числе и величины μ), автоматически смоделировано воздействие горизонтальных напряжений σ_x на боковых границах модели. Точка отсчета по координате X совпадает с вертикальной осью выработки.

Третье измерение модели (толщина по координате Z) совпадает с продольной осью выработки и составляет 4 м (в тестовом расчете) для построения шести комплектов рамных крепей с шагом установки 0,8 м. Крайние рамы разрезаны по вертикальной оси спецпрофиля СВГ для симметрии

модели по координате Z . Условия плоской деформации вводятся также по плоскостям, ограничивающим толщину модели, где действуют сжимающие напряжения (нетронутого массива)

$$\sigma_Z = \frac{\mu}{1-\mu} \gamma H. \quad (9.4)$$

Начало отсчета по координате Z помещено в середину модели (по ее толщине), то есть на расстоянии 2,0 м от боковой граничной плоскости.

Кроме компонент поля напряжений в модели анализируется также величина приведенных напряжений σ . По общепринятому для горных пород закону Кулона-Мора [67, 68, 115, 116]

$$\sigma = \sigma_1 - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3, \quad (9.5)$$

где σ_1 и σ_2 – максимальное и минимальное главные напряжения по элементарному объему;

φ – угол внутреннего трения породы.

Для рамной крепи и арматуры анкеров угол внутреннего трения полагается равным нулю [56] в соответствии с классической теорией прочности металлов.

Требование достижения максимально возможной степени адекватности моделирования геомеханических процессов в окрестности конвейерного штрека предполагает не только построение реальной структуры углевмещающей толщи, но и описание наиболее достоверных (в пределах интервалов вариации характеристик) механических свойств каждого из элементов системы «массив – крепь – охранная конструкция». В этом плане наибольшие трудности моделирования связаны с отражением реального поведения горной породы на всех стадиях ее деформирования: упруго-пластическое, разупрочнение и разрыхление (на стадии так называемого «руинного» разрушения). Учет всех стадий деформирования особенно необходим для слабых и средней крепости горных пород, слагающих углевмещающую толщину пласта m_4^0 .

В связи с вышеизложенным в разработанной модели углевмещающей толщи пласта m_4^0 применяется так называемая полная диаграмма деформирования (от начала нагружения до полного разрушения материала), сущность которой и методика применения описана в предыдущих главах.

В таблице 9.1 приведены принятые к моделированию значения механических свойств пород и угля близлежащей углевмещающей толщи.

Вертикальные напряжения σ_y на верхней границе модели распределены практически равномерно с отклонением не более 3,9% по отношению к величине нетронутого массива $\gamma H = 5,63$ МПа. На нижней границе модели колебания σ_y не превышают 4,3% по отношению к $\gamma H = 6,48$ МПа. На боко-

вых границах модели σ_y монотонно возрастает от 20 до 21,05 МПа с отклонениями не более 6,2% от соответствующей величины γH нетронутого массива. Таким образом, возмущения компоненты σ_y вблизи пластовой выработки снижаются при движении к границам модели (по координатам Y и X) и практически стабилизируются, приближаясь к γH нетронутого массива с допустимой для горнотехнических расчетов погрешностью. Следовательно, по фактору распределения поля вертикальных напряжений σ_y размеры модели вполне достаточны.

Таблица 9.1

№ п/п	Тип породы	$\sigma_{сж}$, МПа	$E \cdot 10^4$, МПа	$\frac{\sigma_{сж}^0}{\sigma_{сж}}$	$\frac{M}{E}$
1	Алевролит	40,0	1,0	0,15	2,0
2	Песчаник	60,0	3,0	0,1	4,0
3	Угольный пласт d_4^1	15,0	0,3	0,2	1,0
4	Алевролит	40,0	1,0	0,15	1,5

Горизонтальные напряжения σ_x наилучшим образом (отклонения до 2,5%) стабилизируются на нижней границе модели и составляют 2,8 МПа при коэффициенте Пуассона нижнего породного слоя (алевролит) $\mu = 0,30$. На верхней и боковых границах тестовой модели наблюдаются более существенные колебания σ_x в сравнении с формулой (9.3), что объясняется возникновением дополнительных напряжений σ_x от прогиба породных слоев в направлении выработки и не противоречит классическим положениям механики подземных сооружений. Однако, эти возмущения σ_x никоим образом не сказываются на поле напряжений σ_x в окрестности выемочного штрека, так как связаны с краевыми эффектами закрепления модели и имеют весьма удаленные от выработки локальные области, максимальные размеры которых составляют 0,7 м на левой границе и 3,5 м на правой границе при размерах самой модели 34 × 60 м. Таким образом, по фактору распределения поля горизонтальных напряжений σ_x размеры модели выбраны обоснованно.

Касательные напряжения τ_{xy} имеют возмущения в окрестности выработки на глубину до 8 м, а на границах модели практически исчезают, что обусловлено пологим падением пласта m_4^0 ($\alpha = 10^\circ$) и по этой причине несущественной разницей между векторами главных напряжений σ_1 , σ_2 и векторами напряжений σ_y , σ_x . Следовательно, по фактору распределения по-

ля касательных напряжений τ_{xy} требование наличия на границах модели начального состояния нетронутого массива выполняется полностью.

Приведенные напряжения σ являются определенной комбинацией компонент σ_y , σ_x и τ_{xy} по формуле (9.5), поэтому имеют аналогичные вполне удовлетворительные отклонения от исходного негидростатического состояния на границах модели.

Выше рассмотрено НДС по плоскостям, ограничивающим модель по высоте и ширине. Необходимо также оценить достаточность толщины (6 комплектов рам, $Z = 4$ м) модели, где главным условием является стабильность поля напряжений в центральной части толщины (рамы №3 и №4). Здесь наиболее ярким показателем являются НДС рамной крепи, где наблюдается наибольший градиент изменения напряжений в модели. Анализ эпюры приведенных напряжений σ , показал, что:

- поле σ в центральных рамах (№3 и №4) практически не отличаются друг от друга;

- поле σ в рамах №2 и №5 имеет отклонения от центральных рам (№3 и №4), не превышающие 6,8% в районах сосредоточения максимумов σ .

Таким образом, толщины модели в 4 м вполне достаточно для избежания краевых эффектов (по координате Z) и выполнения достоверного расчета НДС.

В итоге, анализ поля напряжений в тестовой модели позволяет утверждать, что ее размеры $34 \times 60 \times 4$ м вполне достаточны для достоверного описания процесса деформирования геомеханической системы «массив – крепь – охранная конструкция».

Структура и свойства пород кровли после прохода очистного забоя моделируются в соответствии с современными представлениями о геомеханических процессах сдвижения подработанного углевмещающего массива на пологих пластах Донбасса.

Позади очистного забоя в первую очередь происходит обрушение непосредственной кровли, представленной нижней частью песчаника мощностью 2,0 м.

В выработанном пространстве образуется зона беспорядочного обрушения [58, 89] высотой равной $h_{o,\delta} = 0,97 \dots 1,62$ м; принимаем $h_{o,\delta} = 1,5$ м (рис. 9.2), тогда оставшаяся мощность непосредственной кровли составит 1,5 м.

Модуль деформации обрушенных пород принят на базе исследований [101, 119] $E_{\sigma,o} = 50$ МПа.

Основная кровля моделируется суммарной мощностью 16 м, в которой выделяются две классические зоны – шарнирно-блокового сдвижения и плавного прогиба слоев без нарушения сплошности.

Ввиду жесткости и хрупкости песчаника в кровле на всю его мощность (за исключением зоны беспорядочного обрушения) образуется зона шарнирно-блокового сдвижения путем отделения слоев мощностью 2 м и их разделе-

ния на породные блоки. Размер блоков увеличиваются [58, 101, 117] от пониженных значений за счет вторичного дробления на контакте с зоной беспорядочного обрушения до повышенных значений на контакте с зоной плавного прогиба без нарушения сплошности, что отражено на схеме рис. 9.2. Последнюю по высоте зону прогиба слоев представляют два породных слоя алевролита (мощностью по 4 м), которые в виду своих пониженных деформационных характеристик наиболее соответствует этой задаче.

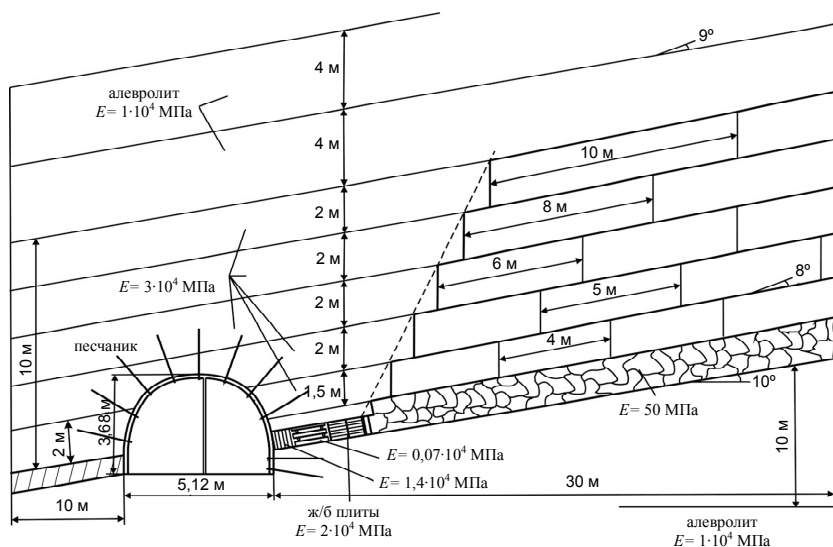


Рис. 9.2. Геомеханическая модель системы «массив – крепь – охранная конструкция»

Обычно, боковая граница шарнирно-блокового сдвижения определяется по величине ψ внутреннего угла полных сдвижений, значение которых для пологих пластов Донбасса оценивается специалистами несколько неоднозначно. Так, проф. Зборщик М.П. указывает на величину $\psi = 65...70^\circ$; проф. Савостьянов А.В. дает значение $\psi = 55^\circ$; компьютерное моделирование в работе [105] оценивает $\psi = 60...67^\circ$; косвенные расчеты по инструментальным наблюдениям определяют $\psi = 58^\circ$. С учетом изложенных данных принято решение моделировать процесс сдвижения надугольной толщи и зависящие породные консоли при $\psi = 60^\circ$.

Кроме этого, крупноблоковая структура части породного массива в выработанном пространстве требует ее моделирования на протяженном участке по координате $X = +40$ м. Со стороны смежного по падению выемочного уча-

стка, где отработка пласта m_4^0 пока не производится, породы в глубине массива сохраняют целостность и их НДС достаточно стабильное; по этой причине вполне достаточно ширины модели $X = -20$ м, что сэкономит вычислительные ресурсы без ущерба точности расчетов.

Применительно к конструкции крепи и охранного элемента основное требование к моделированию системы «массив – крепь – охранная конструкция» – максимально возможная адекватность отражения реального объекта приобретает повышенную актуальность.

Конструкция анкеров, которые относятся к разновидности сталеполимерных, отображена максимально достоверно. Анкера изготовлены длиной 2400 мм из арматурной стали Ст.3 периодического профиля диаметром 24 мм. Механические свойства стали Ст.3 моделируются по полной диаграмме деформирования и согласно [56] имеют такие значения: предел текучести $\sigma_T^a = 220$ МПа, временное сопротивление на разрыв $(\sigma^e)^a = 380...470$ МПа, модуль упругости $E^a = 21 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu^a = 0,3$. Анкера вводятся в шпury диаметром 28 мм и длиной 2300 мм. Пространство между арматурой и породными стенками шпура заполнено быстротвердеющим полимерным составом, механические характеристики которого в имеющейся технической документации не приведены. Поэтому усредненные механические характеристики полной диаграммы деформирования быстротвердеющего полимерного состава взяты из исследований [118]: предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}^{n,a} = 80$ МПа, далее имеет место площадка текучести, аналогичная металлам; модуль деформации при сжатии $E^{n,a} = 0,25 \cdot 10^4$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu^{n,a} = 0,4$. Опорная плита анкера моделируется размером $180 \times 180 \times 8$ мм с механическими характеристиками стали Ст.3. Помимо полного конструктивного соответствия по критерию максимально достоверного моделирования необходимо отобразить реальный режим работы сталеполимерного анкера. Обширные исследования данного вопроса, приведенные в горнотехнической литературе, позволяют утверждать, что сталеполимерный анкер, закрепляемый по всей его длине, имеет весьма жесткую деформационно-силовую характеристику, то есть не допускает сколь-нибудь существенную податливость вплоть до момента разрыва арматуры. Величина податливости сталеполимерного анкера (согласно имеющимся экспериментальным исследованиям) обусловлена в основном растяжением арматуры и не превышает нескольких миллиметров. Более значительная податливость анкера возможна только при нарушении контакта арматуры с породными стенками шпура (низкая адгезия). Поэтому наиболее объективным будет моделирование контакта арматуры с породными стенками шпура как жесткого с однородными начальными условиями контакта по всей длине шпура.

Схема расположения анкеров в поперечном сечении конвейерного штрека приведена на рис. 9.2:

– в берме штрека устанавливаются два анкера с координатами, указанными на схеме; эти два ряда анкеров связаны со стойками рамы канатами;

– в непосредственной кровле пласта устанавливается анкер под углом 30° также соединенный со стойками рамы ниже замка податливости;

– в кровле выработки по контуру верхняка рамы устанавливается пять анкеров;

– в борту выработки со стороны падения пласта устанавливаются два боковых анкера в районе криволинейной части стойки и соединяются с ней канатами;

– общая задача анкеров – сформировать в непосредственной кровле грузонесущую армопородную плиту, которая в левом боку выработки опирается на угольный пласт, а в правом боку – на охранную конструкцию штрека; если плита будет сохранять достаточную целостность, то кровля штрека будет в устойчивом состоянии, так как благодаря конструктивной податливости верхняка рамы он «уйдет» от повышенных вертикальных нагрузок со стороны упрочненной плиты.

Рекомендации по выбору конструкций охранного элемента основаны на накопленном опыте поддержания выемочных штреков позади очистного забоя:

– на бровке штрека шириной 0,9 м пробивается три ряда деревянных стоек диаметром 15 – 18 см, модуль деформации которых при сжатии вдоль волокон принят $E_{д.см} = 1,4 \cdot 10^4$ МПа согласно данным [56];

– забутовка межрядного пространства согласно исследованиям [101, 119] при выкладке вручную характеризуется модулем деформации $E_{бум} = 20$ МПа;

– костровая крепь в чистом виде имеет усредненный модуль деформации $E_{кост} = 700$ МПа при сжатии стоек поперек волокон согласно [56]; при бутокостре $E_{кост.б} = 800$ МПа, при кустокостре $E_{кустр.к} = 1 \cdot 10^4$ МПа; коэффициент поперечной деформации забутовки $\mu_{бум} = 0,4$, согласно исследованиям [120];

– железобетонные плиты БЖБТ (или аналогичной конструкции) моделируются с модулем деформации $E_{жс/\б} = 2 \cdot 10^4$ МПа и коэффициентом Пуассона $\mu = 0,2$ согласно данным [56];

– обрезной ряд крепи из деревянных стоек диаметром 15 – 18 см характеризуется модулем деформации $E_{орг} = 1,4 \cdot 10^4$ МПа.

Породы зоны беспорядочного обрушения (за охранной конструкцией) по исследованиям [58, 89, 101] характеризуются модулем деформации $E_{обр} = 50$ МПа.

В итоге, обоснованы параметры всех основных элементов системы «массив – крепь – охранная конструкция», по которым выполнен расчет ее НДС.

Задача тестирования геомеханической модели – проанализировать, в какой мере результаты расчета НДС системы «массив – крепь – охранная конструкция» соответствуют (или не противоречат) классическим положениям механики подземных сооружений, существующим представлениям о процес-

сах сдвижения слоистого массива в полость выработки, а также визуальным наблюдениям состояния выемочных выработок. В случае положительной оценки разработанная геомеханическая модель рекомендуется к использованию для прогноза состояния выработок и обоснования технических решений по их креплению и охране.

На эпюре вертикальных напряжений σ_y в окрестности выработки четко прослеживаются зоны разгрузки в кровле и почве, а также зона повышенного горного давления в боках, что вполне согласуется с существующими положениями механики подземных сооружений. В зоне ПГД в боках выработки имеются области, где σ_y превышает предел прочности на сжатие угля и алевролита, залегающего в непосредственной почве пласта m_4^0 ; здесь образуются локальные области предельного состояния алевролита, создающие повышенное боковое давление на стойки рамы и приводящие к их изгибу с образованием пластических зон в самой стойке (как раз на участках, примыкающих к алевролиту). В почве выработки зона разгрузки обширнее, чем в кровле, что связано, на наш взгляд, с тем, что кровля выработки упрочнена анкерами.

Обращает внимание характер распределения σ_y по длине анкеров: наиболее нагруженными растягивающими усилиями σ_y являются: заглубленный и примыкающий к выработке участки; средний участок длины анкера разгружен. Такое поведение анкера, закрепляемого по всей длине шпура, описано во многих исследованиях процессов анкерного упрочнения: преимущественное развитие перемещений породного контура выработки в сравнении с заглубленным концом заставляет арматуру анкера растягиваться и перемещаться совместно с породными стенками шпура; обычно величина перемещения анкера совпадает с перемещением породы в районе его середины (это разгруженный участок длины анкера), а по концам анкера перемещение породы или больше (контур выработки) или меньше (заглубленный конец), что обуславливает растяжение анкера и его ответную реакцию сжатия на прилегающий объем пород. Следовательно, полученный результат согласуется с существующими представлениями о механизме анкерного упрочнения пород.

В рамной крепи верхняк достаточно разгружен от σ_y , так как находится под защитой упрочненной анкерами кровли, а стойки (собирающие вертикальную нагрузку по контуру рамы) подвержены значительным напряжениям σ_y с появлением локальных пластических областей в районах примыкания алевролита.

Эпюра горизонтальных напряжений σ_x более однородна. Появляются растягивающие σ_x в почве, которые разупрочняют непосредственную часть основной почвы и могут вызвать развитие пучения. Особо высокая концен-

трация сжимающих σ_x наблюдается в углах выработки (в районе опор стоек) и их величина превышает $\sigma_{сж}$ алеволита, что формирует область предельного состояния и повышенную боковую нагрузку в районе опор стоек. По высоте боков выработки также появляются области растягивающих напряжений σ_x , разупрочняющие породу. Это обусловлено изгибом приконтурной части угольного пласта и пород непосредственной кровли за счет действия повышенных вертикальных напряжений σ_y в этой области. Данный фактор усиливает боковую нагрузку на стойки рамы. В непосредственной кровле появляется концентрация сжимающих σ_x , обусловленная упрочняющим действием анкеров: они формируют в кровле подобие грузонесущей армопородной плиты, в которой при изгибе наблюдается сжатие в верхней ее части, а в нижней – небольшие растягивающие σ_x . Эта картина полностью соответствует сложившимся представлениям о механизме упрочняющего действия анкеров. Четко прослеживается растяжение крайнего анкера, имеющего наименьший угол наклона к оси X, что подтверждает адекватность моделирования анкерной крепи, также как и то, что в арматуре анкеров преимущественно вертикального расположения (как более жестком теле) действуют повышенные сжимающие σ_x в сравнении с породными стенками шпура.

В рамной крепи повышенная боковая нагрузка формирует сжимающие σ_x в верхняке. В стойках рамы действует весьма пониженные сжимающие σ_x , вносящие небольшой вклад в появление пластических зон по сравнению с σ_y .

Эпюра распределения приведенных напряжений σ подтверждает описанные выше закономерности: более глубокая степень разгрузки пород в непосредственной почве; относительно однородное поле пониженных σ в заанкерванной кровле, обуславливающее ее устойчивое состояние; зона ПГД в боках выработки относительно небольших размеров (до 4 – 5 м), в которой разрушению подвержены только локальные области алеволита в непосредственной почве. Уровень приведенных напряжений σ в арматуре анкеров не вызывает ее пластического течения.

Таким образом, проведенное тестирование части геомеханической модели системы «массив – крепь – охранный конструкция» не выявило принципиальных противоречий с современными исследованиями процессов сдвижения углевмещающей толщи в окрестности пластовой выработки, с одной стороны, и шахтными наблюдениями – с другой, что обосновывает целесообразность применения разработанной модели для прогнозной оценки состояния выработок пласта m_4^0 шахты «Белицкая».

9.2. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ НДС ВМЕЩАЮЩИХ КОНВЕЙЕРНЫЙ ШТРЕК ГОРНЫХ ПОРОД

Эпюра распределения вертикальных напряжений σ_y приведена на рис.

9.3. В кровле штрека четко прослеживаются аномалии проявлений горного давления как по ее мощности, так и по простиранию (падению) пласта. Со стороны выработанного пространства образуется область разгрузки (что вполне согласуется с современными представлениями о процессах сдвижения надугольной толщи при очистной выемке) по всему объему пород зоны шарнирно-блокового сдвижения; степень разгрузки составляет $(0,35...0,50)H$ от исходной величины вертикальных напряжений. Процесс разгрузки частично затрагивает и область плавного прогиба слоев без нарушения сплошности и распространяется на высоту до 18 – 20 м. Более значительная степень разгрузки наблюдается в районе границы зависающих консолей, разделяющих обрушающиеся породы под внутренним углом полных сдвижений. Эта область имеет наклонное положение и распространяется от зоны беспорядочного обрушения на высоту до 5,5 м и ширину до 2 м; здесь массив находится под защитой нависающих породных консолей и не испытывает сколь-нибудь существенного вертикального горного давления, что также согласуется с существующими схемами сдвижения надугольной толщи [58, 89, 112 – 114].

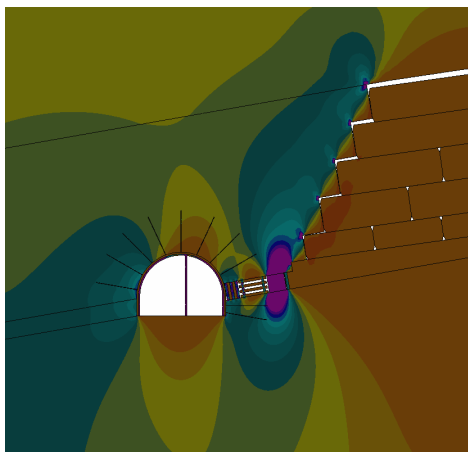


Рис. 9.3. Эпюра вертикальных напряжений σ_y в приконтурных породах массива в окрестности выработки

Эпюра σ_y пород кровли резко меняется при движении по падению от выработанного пространства в сторону нетронутого массива. Сразу же по длине породных консолей образуется область опорного давления с концентрацией $\sigma_y = (1,5...5)H$, распространяющаяся за пределы песчаника в алевролит на высоту до 3,5 м и имеющая максимальную ширину в песчанике до 5,5 м. Формирование зоны опорного давления на границе с выработанным пространством – объективный процесс, описанный во многих исследованиях, а особенность рассматриваемой горнотехнической ситуации заключается в том, что жесткая часть охранной конструкции (плиты БЖБТ) усиливает концентрацию σ_y до величины $(4...5)H$ в прилегающих породах кровли и

почвы, поскольку выполняют свою главную функцию – восприятие основной части опорного давления; поэтому преобладающая часть объема пород зоны опорного давления нагружена в меньшей степени $\sigma_y = (1,5...3) \gamma H$ и будет сохранять устойчивое состояние. За пределами указанной области опорного давления напряжения σ_y снижаются: в вышележащем слое алевролита, поле σ_y быстро стабилизируется на уровне, близком к исходному состоянию $\sigma_y = \gamma H$; в песчанике распространяется влияние конвейерного штрека, поэтому происходят более существенные колебания σ_y . В верхней части песчаника влияние штрека проявляется относительно слабо в виде небольших концентраций $\sigma_y = (1...1,5) \gamma H$. В нижней части песчаника над выработкой образуется свод разгруженных пород $\sigma_y = (0...0,4) \gamma H$, распространяющиеся в кровлю до 2,5 м, а по ширине – до 3,5 м; ось свода наклонена в сторону выработанного пространства, что согласуется с существующими исследованиями в этой области геомеханики. В непосредственной кровле над костровой частью охранной конструкции также образуется небольшой свод разгруженных пород (высотой до 0,8 м и по ширине костровой крепи), а над рядами деревянных стоек возникает небольшая концентрация $\sigma_y = (1,2...1,7) \gamma H$ высотой до 0,7 м. Такое распределение σ_y над указанными элементами охранной конструкции говорит о том, что они в целом выполняют свои функции по разгрузке приконтурных пород и передаче основной части опорного давления на жесткий охранный элемент.

По падению пласта со стороны нетронутого массива в кровле и почве образуется вполне ожидаемая область небольшой концентрации $\sigma_y = (1,5...2) \gamma H$, так как здесь сохраняется целостность углевмещающей толщи и она активно сопротивляется горному давлению. В приконтурных породах почвы пласта в районе расположения штрека эпюра σ_y повторяется в качественном плане; только в почве выработки зона разгрузки $\sigma_y = (0...0,4) \gamma H$ заметно обширнее (глубина до 4,0 м и по всей ширине выработки), что наблюдается практически повсеместно (при моделировании НДС массива вокруг выработки) и объясняется менее устойчивой (к проявлению горного давления) плоской формой почвы выработки.

В целом, исследование эпюры распределения вертикальных напряжений σ_y во вмещающем штрек породном массиве указывает на следующие опасные участки с точки зрения потери устойчивости (разупрочнения) породы: непосредственная кровля и почва угольного пласта, примыкающая к жесткой части охранной конструкции, где образуются концентрации сжимающих $\sigma_y = (4...5) \gamma H$; непосредственная кровля по ширине костровой крепи, где

возможно появление на локальных участках растягивающих σ_y ; непосредственная почва под штреком, где также возможно появление растягивающих σ_y , которым слабые и средней крепости алевролиты и песчаники весьма существенно снижают сопротивление.

Следующим этапом анализа НДС массива в окрестностях конвейерного штрека является изучение характера распределения горизонтальных напряжений σ_x , эпюра которых приведена на рис. 9.4. Со стороны восстания угольного пласта в обрушенных породах над выработанным пространством устанавливается достаточно равномерное поле σ_x . В зоне беспорядочного обрушения действуют сжимающие

$\sigma_x = (0...0,5)\lambda\gamma H$, то есть, эта зона частично или полностью разгружена от горизонтальных напряжений σ_x (здесь λ – коэффициент бокового распора); в ней пониженные σ_x образуются в результате уплотнения (под действием σ_y) полностью разрушенных пород, которые приобретают свойства квазисыпучей среды, а в условиях ограниченного ее перемещения в горизонтальном направлении появляются усилия горизонтального распора σ_x от действия

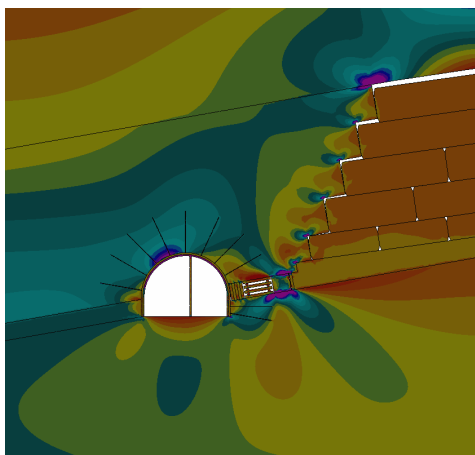


Рис. 9.4. Эпюра горизонтальных напряжений σ_x в приконтурных породах массива в окрестности выработки

вертикальных напряжений σ_y [68, 114, 116, 121]. Породы зоны шарнирно-блокового сдвижения, залегающие выше, разбиты трещинами на блоки и разупрочнены только частично, поэтому при прогибе в выработанное пространство в них возникают небольшие растягивающие $\sigma_x = 0...1$ МПа, которые вызывают дополнительное разупрочнение массива. Следующая по высоте зона плавных прогибов слоев без нарушения сплошности представлена алевролитом, в нижней части которого возникают растягивающие σ_x до 3 – 4 МПа, генерирующие развитие трещин и более интенсивное опускание в выработанное пространство. На границе с песчаником в районе нежесткого защемления слоев алевролита возникает концентрация сжимающих σ_x до 12 – 15 МПа, что полностью соответствует существующим представлениям о зональном деформировании надугольной толщи в выработанное пространство.

В районе границы выработанного пространства в зависящих породных консолях образуется устойчивая закономерность перехода небольших рас-

тягивающих σ_x (до 2,5 МПа) в верхней части породного слоя в локальные области сжимающих σ_x (5 – 12 МПа) в нижней части слоя в районе его нежесткого защемления. Над штреком и со стороны падения в песчанике кровли устанавливается относительно однородное (по слоям) поле σ_x от пониженных значений $\sigma_x = (0,5...1)\lambda\gamma H$ в верхних слоях до повышенных сжимающих $\sigma_x = (3...4)\lambda\gamma H$ в нижних слоях, что характеризует изгиб в целом всего мощного песчаника; от этого прогиба в приконтурной части кровли образуется локальная зона (высотой до 0,5 м и шириной до 1,5 м) с концентрацией $\sigma_x = (5...6)\lambda\gamma H$.

В породах почвы отмечается тенденция постепенного перехода концентраций сжимающих $\sigma_x = (1,5...2)\lambda\gamma H$ со стороны падения пласта в растягивающие σ_x до 2,5 МПа под выработанным пространством; но также имеются и локальные возмущения поля σ_x , в основном, в непосредственной почве. Так, по ширине выработки образуется пологий «обратный свод» (глубиной до 1,1 м), где в почве появляются растягивающие σ_x до 3 – 4 МПа, что способствует развитию процесса пучения почвы. Также локальная зона разгрузки возникает в берме штрека по ширине установки податливой части охранной конструкции; здесь формируются очень ограниченные участки действия растягивающих σ_x до 1 – 2 МПа. Под жесткой частью охранной конструкции, напротив, возникает концентрация сжимающих напряжений σ_x до 12 – 15 МПа. Наконец, под выработанным пространством идет поднятие непосредственной почвы, на что указывают растягивающие напряжения σ_x на концевом участке лавы и которое полностью согласуется с современными представлениями о деформировании массива при очистной выемке.

В итоге, по фактору поля распределения горизонтальных напряжений σ_x можно выделить следующие опасные зоны в приконтурных породах конвейерного штрека:

- растягивающие напряжения в непосредственной почве под выработкой, провоцирующие процесс пучения;
- растягивающие напряжения в непосредственной кровле угольного пласта над костровой частью охранной конструкции, способные увеличить опускание вышележащих слоев кровли за счет разупрочнения нижележащих;
- растягивающие напряжения в приконтурной части бермы штрека, при разупрочнении которой развивается боковое давление на стойки рамной крепи;
- концентрации сжимающих σ_x над и под жесткой частью охранной конструкции – при разупрочнении этих объемов пород усиливается опускание кровли.

Заключительным этапом анализа НДС пород в окрестности конвейерного штрека является изучение поля распределения приведенных напряжений

σ , эпюра которых показана на рис. 9.5. Основное свойство приведенных напряжений σ заключается в оценке совместного действия всех компонент напряжений, определении степени нагруженности любого материала (в том числе и горной породы) по отношению к величине, характеризующей его предельное состояние и наступление стадии разупрочнения. Для горной породы оценка наступления предельного состояния производится по двум условиям: действие растягивающих напряжений по какой-либо из компонент напряжений σ_y или σ_x и превышение величиной σ сопротивления породы сжатию. По первому условию оценка устойчивости какого-либо породного объема была проведена ранее по напряжениям σ_y и σ_x . Теперь оценим

величину приведенных напряжений σ , точнее области их максимальной концентрации, которых не так уж много в пределах моделируемого объекта. Вполне естественно, что в области выработанного пространства породы разгружены, также как и в почве выработки; другие объемы пород кровли и почвы находятся под действием среднего уровня напряжений $\sigma = 4 \dots 16$ МПа и только некоторые участки подвергаются концентрации $\sigma = 25 \dots 70$ МПа, где вероятно наступление предельного состояния и разупрочнение пород от сжимающих напряжений.

Рассмотрим более подробно эти области, начиная с нетронутого массива со стороны смежного выемочного участка. Здесь представляют интерес две области: приконтурные породы шириной до 0,4 м и по высоте от угольного пласта до центральной части свода выработки, где $\sigma \leq 35$ МПа и не в состоянии разупрочнить песчаник ($f = 6$), если он не ослаблен действием других факторов (например, водонасыщением); приконтурная часть пласта m_4^0 шириной до 1,3 м, где $\sigma \geq 15$ МПа и провоцирует разупрочнение угля ($f = 1,5$) на указанную ширину. На границе с выработанным пространством действуют очаги концентрации σ до 35 МПа в весьма ограниченных областях нежесткого защемления консолей песчаника в кровле. Такая величина σ не способна разупрочнить песчаник по указанной выше причине, кроме того, данные концентрации удалены от выработки и не представляют опасности для ее устойчивости. Остаются области концентраций $\sigma = 25 \dots 70$ МПа, примыкающие к жесткой части охранной конструкции в кровле и почве. В

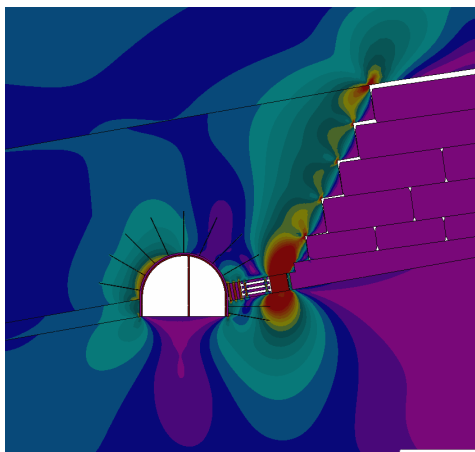


Рис. 9.5. Эпюра приведенных напряжений σ в приконтурном массиве в окрестности выработки

кровле концентрация $\sigma \leq 35$ МПа распространяется в высоту по ширине до 1,8 м и для неослабленного песчаника не представляет опасности. Более высокая концентрация $\sigma = 35 \dots 53$ МПа имеет ограниченное распространение по высоте до 1,1 м и по ширине до 1,2 м, где при определенных условиях уже может начинаться процесс разупрочнения песчаника; в локальной области высотой до 0,5 м и шириной до 0,4 м концентрация $\sigma = 53 \dots 70$ МПа и здесь прогнозируется разупрочнение песчаника. Аналогичная ситуация наблюдается и под жесткой частью охранной конструкции в породах непосредственной почвы, представленной алевролитом с коэффициентом крепости $f = 4$. Здесь условно «неразрушающая» концентрация $\sigma \leq 35$ МПа (если нет ослабления почвы из-за ее увлажнения) занимает область глубиной до 1,5 м и шириной до 1,9 м. Более высокая концентрация $\sigma = 35 \dots 53$ МПа, разупрочняющая алевролит, сосредоточена в весьма ограниченной области глубиной до 0,7 м и шириной до 0,6 м.

Таким образом, разупрочнение приконтурных пород от действия сжимающих напряжений происходит в таких ограниченных областях: угольном пласте со стороны смежного выемочного участка; породах кровли и почвы, примыкающих к жесткой части охранной конструкции. Разупрочнение от действия растягивающих напряжений прогнозируется на следующих участках приконтурных пород: непосредственная почва под конвейерным штреком, где наблюдается совместное влияние растягивающих σ_y и σ_x , провоцирующих пучение; растягивающие σ_y и σ_x в непосредственной кровле над костровой частью охранной конструкции; растягивающие σ_x в приконтурной части бермы штрека, при разупрочнении которой развивается боковое давление на стойки рамной крепи.

10. ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ВМЕЩАЮЩЕГО МАССИВА И ПРИКОНТУРНЫХ ПОРОД 5-го КОНВЕЙЕРНОГО ШТРЕКА БЛОКА №10 ПЛАСТА d_4 ШАХТЫ «КРАСНОАРМЕЙСКАЯ – ЗАПАДНАЯ №1»

Накопленный опыт компьютерного моделирования НДС вмещающего выработку породного массива и ее крепи указывает на необходимость предварительной отработки геомеханической модели, подразумевающей последовательное выполнение ряда задач с обязательным тестированием полученных результатов на предмет соответствия классическим положениям механики подземных сооружений и натурным наблюдениям в конкретных горно-геологических и горнотехнических условиях. Этот анализ необходим не только для контроля процесса моделирования и устранения возможных технических ошибок в технологии выполнения расчетов. Здесь также приходится постоянно искать компромисс между вычислительными мощностями компьютеров, возможностями программного обеспечения и стремлением к максимальной степени отображения реального объекта.

10.1. ПОСТРОЕНИЕ ОБОСНОВАННОСТИ И ТЕСТИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ 5-го КОНВЕЙЕРНОГО ШТРЕКА

Модель структуры близлежащего породного массива в окрестностях конвейерного штрека и угольного пласта d_4 включает 10 породных слоев и угольных пластов, которые пронумерованы в порядке увеличения глубины их расположения: 1 – песчаник мощностью 5,0 м; 2 – алевролит мощностью 4,5 м; 3 – пласт d_4^1 мощностью 0,3 м; 4 – алевролит мощностью 0,7 м; 5 – песчаник мощностью 18,8 м; 6 – алевролит мощностью 3,7 м; 7 – пласт d_4 мощностью 2,07 м; 8 – алевролит мощностью 1 м; 9 – песчаник мощностью 7,1 м; 10 – алевролит мощностью 2,7 м.

В целом высота модели (по координате Y) углевмещающей толщи составила 44,9 м; ширину модели (по координате X) в тестовом расчете принимаем 80 м, по 40 в каждую сторону от вертикальной оси штрека.

Конвейерный штрек на базовом участке проведен с комбинированной подрывкой кровли и почвы пласта d_4 на среднюю глубину 1 м, что отражено в модели. В соответствии с планом горных работ и данными скважины №4377 глубина расположения кровли песчаника (верхняя граница модели) составляет $H \approx 800$ м.

Условия на границах модели рассчитаны по изложенной в §9.1 методике. Верхняя горизонтальная плоскость модели имеет отметку 797,2 м, что при средневзвешенном объемном весе пород $\gamma = 25 \text{ кН/м}^3$ формирует вертикальную нагрузку на верхней границе модели $\sigma_y = \gamma H = 19,93 \text{ МПа}$. Принимаем в расчетах $\sigma_y = 20 \text{ МПа}$. Нижняя граница модели имеет жесткую опору и служит плоскостью начала отсчета вертикальной координаты Y . По боковым плоскостям модели введено условие плоской деформации, что отвечает реальному механизму деформирования массива.

Помещая в базу данных сведения о механических характеристиках углевмещающей толщи (в том числе и величины μ), происходит автоматическое моделирование воздействия горизонтальных напряжений σ_x на боковых границах модели. Точка отсчета по координате X совпадает с вертикальной осью выработки.

Третье измерение модели (толщина по координате Z) совпадает с продольной осью выработки и составляет 4 м (в тестовом расчете) для построения шести комплектов рамных крепей с шагом установки 0,8 м.

Учет всех стадий деформирования особенно необходим для слабых и средней крепости горных пород, слагающих углевмещающую толщу на глубине $H \approx 800 \text{ м}$.

В связи с вышеизложенным в разработанной модели углевмещающей толщи пласта d_4 применяется так называемая полная диаграмма деформирования

База данных механических свойств пород углевмещающей толщи на экспериментальном участке выработки приведена в табл. 10.1.

Таблица 10.1

№ п/п	Тип породы	$\sigma_{сж}$, МПа	$E \cdot 10^4$, МПа	$\frac{\sigma_{сж}^o}{\sigma_{сж}}$	$\frac{M}{E}$
1	Песчаник	90,0	2,0	0,08	4,0
2	Алевролит	55,5	0,9	0,12	2,0
3	Угольный пласт d_4^1	13,5	0,2	0,2	1,0
4	Алевролит	33,7	0,9	0,15	1,5
5	Песчаник	90,0	2,0	0,08	4,0
6	Алевролит	55,5	0,9	0,12	2,0
7	Угольный пласт d_4	13,5	0,2	0,2	1,0
8	Алевролит	46,0	0,9	0,15	0,8
9	Песчаник	72,0	1,8	0,1	3,0
10	Алевролит	46,0	0,9	0,15	0,8

Минимально достаточные размеры модели (по координатам Y , X и Z) определены по условию стабилизации поля напряжений по ее границам в соответствии с начальным негидростатическим состоянием нетронутого массива. Используя приведенные данные, построена тестовая модель, анализ НДС которой дал следующие результаты.

Вертикальные напряжения σ_y на верхней границе модели распределены практически равномерно с отклонением не более 3,9% по отношению к величине нетронутого массива $\gamma H = 20$ МПа. На нижней границе модели колебания σ_y не превышают 4,3% по отношению к $\gamma H = 21,05$ МПа (глубина нижней границы $H = 842,1$ м). На боковых границах модели σ_y монотонно возрастает от 20 до 21,05 МПа с отклонениями не более 6,2% от соответствующей величины γH нетронутого массива. Таким образом, возмущения компоненты σ_y вблизи пластовой выработки снижаются при движении к границам модели (по координатам Y и X) и практически стабилизируются, приближаясь к γH нетронутого массива с допустимой для горнотехнических расчетов погрешностью. Следовательно, по фактору распределения поля вертикальных напряжений σ_y размеры модели вполне достаточны.

Горизонтальные напряжения σ_x наилучшим образом (отклонения до 2,5%) стабилизируются на нижней границе модели и составляют 9,0 МПа при коэффициенте Пуассона нижнего породного слоя (алевролит) $\mu = 0,30$. На верхней и боковых границах тестовой модели наблюдаются более существенные колебания σ_x в сравнении с формулой (9.3), что объясняется возникновением дополнительных напряжений σ_x от прогиба породных слоев в направлении выработки и не противоречит классическим положениям механики подземных сооружений. Эти возмущения превышают допустимые отклонения в 10% только для тонких прослоек породы (алевролит в кровле мощностью 0,7 м и угольный пласт d_4^1 мощностью 0,3 м), которые имеют достаточно низкий момент сопротивления сечения изгибу. Однако, эти возмущения σ_x никоим образом не сказываются на поле напряжений σ_x в окрестности выемочного штрека, так как связаны с краевыми эффектами закрепления модели и имеют весьма удаленные от выработки локальные области, максимальные размеры которых составляют 0,7 м на левой границе и 3,5 м на правой границе при размерах самой модели $44,9 \times 80$ м. Таким образом, по фактору распределения поля горизонтальных напряжений σ_x размеры модели выбраны обоснованно.

Касательные напряжения τ_{xy} имеют возмущения в окрестности выработки на глубину до 8 м, а на границах модели практически исчезают, что обусловлено малым углом падения пласта d_4 ($\alpha = 2 \dots 3^\circ$) и по этой причине нет

существенной разницы между векторами главных напряжений σ_1 , σ_2 и векторами напряжений σ_y , σ_x . Следовательно, по фактору распределения поля касательных напряжений τ_{xy} требование наличия на границах модели начального состояния нетронутого массива выполняется полностью.

Приведенные напряжения σ являются определенной комбинацией компонент σ_y , σ_x и τ_{xy} , поэтому имеют аналогичные вполне удовлетворительные отклонения от исходного негидростатического состояния на границах модели.

Выше рассмотрено НДС по плоскостям, ограничивающим модель по высоте и ширине. Необходимо также оценить достаточность толщины (6 комплектов рам, $Z = 4$ м) модели, где главным условием является стабильность поля напряжений в центральной части толщины (рамы №3 и №4). Здесь наиболее ярким показателем являются НДС рамной крепи, где наблюдается наибольший градиент изменения напряжений в модели. Анализ эпюры приведенных напряжений σ показал, что можно сделать такие выводы:

– поле σ в центральных рамах (№3 и №4) практически не отличаются друг от друга;

– поле σ в рамах №2 и №5 имеет отклонения от центральных рам (№3 и №4), не превышающие 6,8% в районах сосредоточения максимумов σ .

Таким образом, толщины модели в 4 м вполне достаточно для избежания краевых эффектов (по координате Z) и выполнения достоверного расчета НДС.

В итоге, анализ поля напряжений в тестовой модели позволяет утверждать, что ее размеры $44,9 \times 80 \times 4$ м вполне достаточны для достоверного описания процесса деформирования геомеханической системы «горный массив – охранная конструкция – крепь».

Структура и свойства пород кровли после прохода очистного забоя моделируются в соответствии с современными представлениями о геомеханических процессах сдвижения подработанного углевмещающего массива на пологих пластах Донбасса (см. §9.1).

Позади очистного забоя в первую очередь происходит обрушение непосредственной кровли, представленной алевролитом мощностью $m_1^k = 3,7$ м.

В выработанном пространстве образуется зона беспорядочного обрушения [50, 89] высотой, равной $h_{\bar{\sigma},o} \approx 4,8$ м и с учетом уплотнения обрушенных пород под давлением основной кровли принимаем $h_{\bar{\sigma},o} \approx 4,7$ м. Модуль деформации обрушенных пород принят на базе исследований [101, 119] $E_{\bar{\sigma},o} = 100$ МПа.

Основная кровля моделируется суммарной мощностью 33 м, в которой выделяются две классические зоны – шарнирно-блокового сдвижения и плавного прогиба слоев без нарушения сплошности. Согласно работам [58, 89] на пологих пластах Донбасса (тонких и средней мощности) высота зоны

шарнирно-блокового сдвижения оценивается величиной $h_{ш.б.с} = 18,2...33$ м и однозначно попадает в размеры модели. Крайний верхний слой из песчаника смоделирован с плавным прогибом без нарушения сплошности и характеризует верхнюю границу зоны шарнирно-блокового сдвижения.

Структура зоны шарнирно-блокового сдвижения пород кровли моделируется из следующих соображений. В первую очередь необходимо обосновать длины a_i породных консолей, образующихся в процессе обрушения кровли и зависящих пород со стороны выработанного пространства.

Обычно, боковая граница шарнирно-блокового сдвижения определяется по величине ψ внутреннего угла полных сдвижений, значение которых для пологих пластов Донбасса оценивается по методике §9.1.

Тогда первая консоль из пород непосредственной кровли зависит длиной

$$a_1 = m_1^k \operatorname{tg} \psi \approx 2,1 \text{ м}, \quad (10.1)$$

отсчитывая от крайнего ряда деревянных стоек (рис. 10.1). Далее на границе с песчаником основной кровли откладываем угол $\psi = 60^\circ$ и определяем длины консолей вышележащих породных слоев:

$$\left. \begin{array}{l} \text{песчаник: } a_2 = m_2^k \operatorname{tg} 30^\circ \approx 10,9 \text{ м;} \\ \text{алевролит: } a_3 = m_3^k \operatorname{tg} 30^\circ \approx 0,4 \text{ м;} \\ \text{пласт } d_4^1: a_4 = m_4^k \operatorname{tg} 30^\circ \approx 0,2 \text{ м;} \\ \text{алевролит: } a_5 = m_5^k \operatorname{tg} 30^\circ \approx 2,6 \text{ м.} \end{array} \right\} \quad (10.2)$$

Косвенная проверка достоверности значений длин породных консолей может быть осуществлена по шагу посадки непосредственной и основной кровли, так как на пологих пластах Донбасса имеются данные [58], что внутренний угол полных сдвижений по простиранию (перпендикулярно линии очистного забоя) примерно равен внутренним углам полных сдвижений по восстанию (падению). Из технической документации отработки смежного выемочного участка (4 южная лава блока №10) следует, что шаг посадки основной кровли составляет $a_1 = 1...2$ м (по расчету 2,1 м), а песчаника основной кровли $a_2 = 10...15$ м (по расчету 10,9 м). Следовательно, моделируемые длины породных консолей, примерно, соответствуют реальным процессам сдвижения надугольной толщи.

Вполне очевидно, что мощный песчаник ($m_2^k = 18,8$ м) не обрушается мгновенно по всей высоте, а происходит его последовательное расслоение (по плоскостям ослаблений) и обрушение в выработанное пространство. Поэтому, по аналогии с работой [122], где также было проведено моделирование сдвижения надугольной толщи на шахте «Красноармейская-Западная №1», песчаник разбит на 7 слоев: по данным скважины №4377 четко прослежива-

ются две плоскости ослабления, в результате которых образуется нижний крайний слой мощностью 1,5 м и верхний крайний слой мощностью 3,0 м, которые и смоделированы в песчанике. Остальные слои песчаника смоделированы произвольно в соответствии с расчетной схемой на рис. 10.1.

При моделировании зоны шарнирно-блокового сдвижения учтено вторичное дробление консоли нижнего слоя песчаника: под воздействием горного

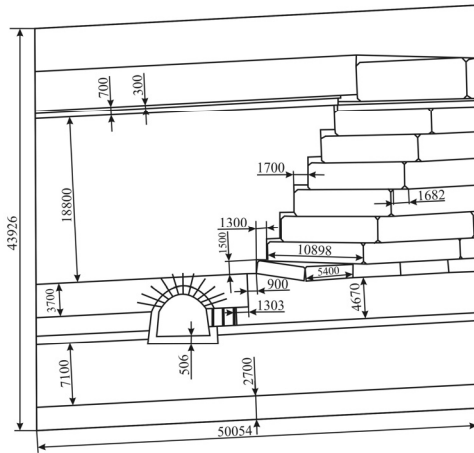


Рис. 10.1. Модель подработанной углевмещающей толщи

давления и с течением времени вышележащие литологические разницы опускаются и создают высокую нагрузку на породную балку нижнего слоя песчаника мощностью 1,5 м; наиболее вероятно ее разрушение посередине пролета, что и отражено путем разделения породного блока длиной 10,9 м на два блока длиной по 5,45 м; крайний полублок (со стороны охранной конструкции) поворачивается и опускается на разрушенные породы, а второй полублок полностью ложится на «подушку» из разрушенных пород.

В заключение обоснования отметим, что крупноблоковая структура части породного массива в выработанном пространстве требует ее моделирования на протяженном участке по координате $X = +40$ м. Со стороны смежного выемочного участка, где отработка пласта d_4 пока не производится, породы в глубине массива сохраняют целостность и их НДС достаточно стабильное; по этой причине вполне достаточно ширины модели $X = -20$ м, что сэкономит вычислительные ресурсы без ущерба точности расчетов.

Применительно к моделированию конструкции крепи и охранного элемента трудности заключаются в отражении реальных конструктивных особенностей элементов крепи, линейные размеры которых многократно меньше средних размеров элементов углевмещающей толщи, что требует более мелкой конечно-элементной сетки и существенно увеличивает продолжительность расчетов даже при использовании достаточной мощной компьютерной техники. Тем не менее, в данных исследованиях решена задача адекватного отражения конструкции рамной крепи КШПУ-20,3 (рис. 10.2).

Рамы изготовлены из спецпрофиля СВП-27 с шагом установки $L = 0,8$ м вдоль выработки – более облегченный вариант СВП-27 взамен СВП-33 не снижает устойчивости штрека по следующим причинам:

– пониженной жесткости профиля и по этой причине повышенной адаптации к максимумам внешней нагрузки;

- достаточно густой сетки армирования кровли анкерами, формирующими железопородную плиту, которая воспринимает значительную часть горного давления;
- сооружению охранной конструкции, воспринимающей основную часть опорного давления позади лавы.

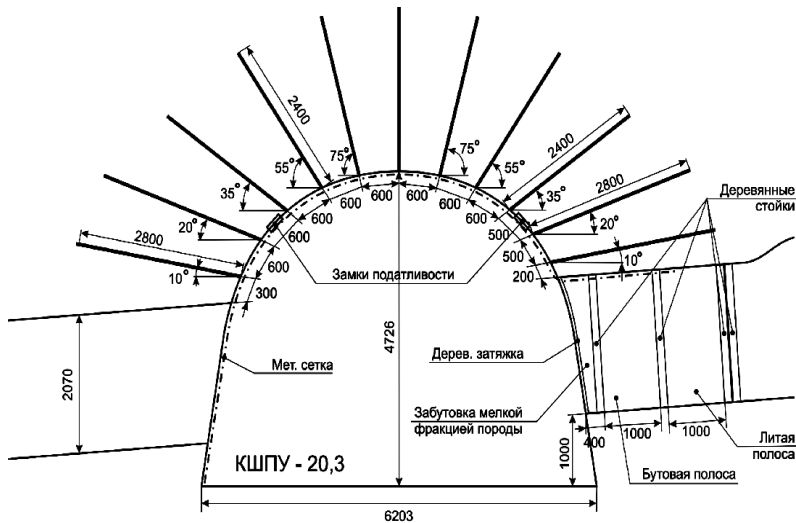


Рис. 10.2. Конструкция крепи и охранного элемента выемочной выработки

Данные механических параметров грузонесущих элементов крепежной и охранной систем аналогичные приведенным в §9.1.

Тестирование геомеханической модели выполнено по экспериментально полученным компонентам вертикальных σ_y , горизонтальных σ_x и приведенных σ напряжений.

На эпюре вертикальных напряжений σ_y в окрестности выработки четко прослеживаются зоны разгрузки в кровле и почве и зона повышенного горного давления в боках, что вполне согласуется с существующими положениями механики подземных сооружений. В зоне ПГД в боках выработки имеются области, где σ_y превышает предел прочности на сжатие угля и алевролита, залегающего в непосредственной кровле и почве пласта d_4 ; здесь образуются локальные области предельного состояния алевролита, создающие повышенное боковое давление на стойки рамы и приводящие к их изгибу с образованием пластических зон в самой стойке (как раз на участках, примыкающих к аргиллиту). В почве выработки зона разгрузки обширнее, чем в кровле, что связано, на наш взгляд, с двумя факторами: во-

первых, кровля выработки упрочнена анкерами; во-вторых, в почве залегает мощный слой песчаника (обладающего повышенными прочностными и деформационными характеристиками по отношению к соседним слоям), который благодаря своей жесткости сдерживает проявления горного давления в почве, что также не противоречит современным исследованиям. Также общеизвестен факт (в механике подземных сооружений) более интенсивного нагружения (разгрузки) того породного слоя (в составе слоистой толщи), который имеет повышенные деформационные характеристики в сравнении с соседними слоями, что и подтверждено на эпюре σ_y .

Обращает внимание характер распределения σ_y по длине анкеров: наиболее нагруженными растягивающими усилиями σ_y являются участки: заглубленный и примыкающий к выработке; средний участок длины анкера разгружен. Такое поведение анкера, закрепляемого по всей длине шпура, описано во многих исследованиях процессов анкерного упрочнения: преимущественное развитие перемещений породного контура выработки в сравнении с заглубленным концом заставляет арматуру анкера растягиваться и перемещаться совместно с породными стенками шпура; обычно величина перемещения анкера совпадает с перемещением породы в районе его середины (это разгруженный участок длины анкера), а по концам анкера перемещение породы или больше (контур выработки) или меньше (заглубленный конец), что обуславливает растяжение анкера и его ответную реакцию сжатия на прилегающий объем пород. Следовательно, полученный результат согласуется с существующими представлениями о механизме анкерного упрочнения пород.

В рамной крепи верхняк достаточно разгружен от σ_y , так как находится под защитой упрочненной анкерами кровли, а стойки (собирающие вертикальную нагрузку по всему контуру рамы) подвержены значительным напряжениям σ_y с появлением локальных пластических областей в районах примыкания алевролита, что в целом согласуется с визуальными наблюдениями в натуре.

Эпюра горизонтальных напряжений σ_x более однородна. Появляются растягивающие σ_x в почве выработки, которые разупрочняют непосредственную часть основной почвы и могут вызвать развитие пучения. Особо высокая концентрация сжимающих σ_x наблюдается в углах выработки (в районе опор стоек) и их величина превышает $\sigma_{с.ж}$ алевролита, что формирует область предельного состояния и повышенную боковую нагрузку в районе опор стоек. По высоте боков выработки также появляются области растягивающих напряжений σ_x , разупрочняющие породу. Это обусловлено изгибом приконтурной части угольного пласта и пород непосредственной кровли за счет действия повышенных вертикальных напряжений σ_y в этой области. Данный фактор усиливает боковую нагрузку на стойки рамы. В непосредст-

венной кровле появляется концентрация сжимающих σ_x , обусловленная упрочняющим действием анкеров: они формируют в кровле подобие грузонесущей породной балки (плиты), в которой при изгибе наблюдается сжатие в верхних ее частях, а в нижней – небольшие растягивающие σ_x . Эта картина полностью соответствует сложившимся представлениям о механизме упрочняющего действия анкеров. Четко прослеживается растяжение крайнего анкера, имеющего наименьший угол наклона к оси X , что подтверждает адекватность моделирования анкерной крепи, также как и то, что в арматуре анкеров преимущественно вертикального расположения (как более жестком теле) действуют повышенные сжимающие σ_x в сравнении с породными стенками шпура.

В рамной крепи повышенная боковая нагрузка формирует сжимающие σ_x в верхняке. В стойках рамы действует весьма пониженные сжимающие σ_x , вносящие небольшой вклад в появление пластических зон по сравнению с σ_y .

Эпюра распределения приведенных напряжений σ подтверждает описанные выше закономерности: более глубокая степень разгрузки пород в непосредственной почве; относительно однородное поле пониженных σ в заанкерванной кровле, обуславливающее ее устойчивое состояние; зона ПГД в боках выработки относительно небольших размеров (до 4 – 5 м), в которой разрушению подвержены только локальные области алевролита в непосредственной кровле и почве. Уровень приведенных напряжений σ в арматуре анкеров не вызывает ее пластического течения, а в стойках рамы существует две области (район опоры и на высоте 1,8 – 2 м от почвы) появления пластического состояния стали Ст.5.

Таким образом, проведенное тестирование части геомеханической модели не выявило принципиальных противоречий с современными исследованиями процессов сдвижения углевмещающей толщи в окрестности пластовой выработки, с одной стороны, и шахтными наблюдениями – с другой, что обосновывает целесообразность применения разработанной модели для прогнозной оценки состояния выемочных выработок при отработке пологих угольных пластов, например, блока №10 шахты «Красноармейская-Западная №1».

10.2. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ НДС ВМЕЩАЮЩИХ КОНВЕЙЕРНЫЙ ШТРЕК ГОРНЫХ ПОРОД

10.2.1. АНАЛИЗ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕГО ПОРОДНОГО МАССИВА

Анализ НДС в пределах размеров модели (44,9 × 60 м) необходим для выявления закономерностей поведения угле вмещающего породного массива в целом и его влияния на комбинированную крепь и охранную конструкцию, например, 5-го южного конвейерного штрека. Для всесторонней оценки состояния породного массива исследование проведено по каждой из основных компонент напряжений: вертикальных σ_y , горизонтальных σ_x и приведенных σ

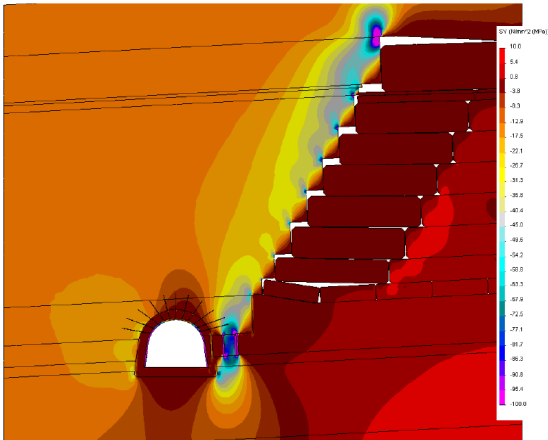


Рис. 10.3. Эпюра вертикальных напряжений σ_y в угле вмещающем породном массиве

напряжений. Анализ НДС массива выполнен по эпюре вертикальных напряжений, представленной на рис. 10.3. Со стороны смежного выемочного участка наблюдается относительно однородное поле σ_y , что обусловлено низкими прочностными и деформационными свойствами угольного пласта d_4 , который играет роль легко деформирующейся «постели», сглаживающей концентрации напряжений изгиба слоев кровли в полость штрека и далее в выработанное пространство. Данный факт подтверждает существующие за-

кономерности нивелирования зоны опорного давления при снижении жесткости угольного пласта, подверженного к тому же частичному разупрочнению (как будет установлено ниже). Зона опорного давления распространяется в основную кровлю всего на высоту до 2,6 м и на ширину в нетронутый массив – до 8 – 9 м, далее эпюра σ_y стабилизируется на уровне исходного негидростатического состояния ($\sigma_y = \gamma H$). Концентрация σ_y в указанной области также невелика ($\sigma_y = 1,10\gamma H$), а при приближении к штреку увеличивается до $(1,5...1,8)\gamma H$. Такая ситуация объясняется также залеганием в основной кровле мощного и крепкого песчаника, воспринимающего основную часть горного давления.

Непосредственно над штреком образуется зона разгрузки, затрагивающая основную кровлю (песчаник) на высоту до 2,8 м, в которой пониженные сжимающие σ_y переходят в растягивающие до 3 – 5 МПа при приближении к контуру штрека.

Наличие, размеры и форма зоны разгрузки в кровле штрека также не противоречат существующим геомеханическим исследованиям в данной области.

Значительные возмущения поля напряжений σ_y наблюдается при приближении к выработанному пространству, конкретно, к поверхности, характеризующую внутреннюю зону полных сдвижений. Здесь в основной и непосредственной кровле σ_y увеличивается до $2\gamma H$ на расстоянии 1,5 – 4 м от поверхности внутренней зоны полных сдвижений (то есть, контакта непосредственной кровли с зоной беспорядочного обрушения, а основной кровли – с зоной шарнирно-блокового сдвижения). Ближе к упомянутому контакту $\sigma_y = (2,5...3)\gamma H$, а наибольшая концентрация $\sigma_y = (4...5)\gamma H$ возникает в верхних угловых частях разломов при обрушении основной кровли. Однако эти концентрации σ_y носят локальный характер и области разупрочнения не оказывают существенного влияния на границу внутренней зоны полных сдвижений, внутри которой происходит разгрузка надугольной толщи, что соответствует современным представлениям о процессах сдвижения подработанной толщи. Ближняя к границе группа породных блоков основной кровли наиболее разгружена на уровне $\sigma_y = (0...0,2)\gamma H$, что обусловлено защитными функциями породной консоли основной кровли, нависающей над выработанным пространством. При дальнейшем движении в сторону выработанного пространства вертикальные напряжения увеличиваются до $0,4\gamma H$, при достаточно равномерном их распределении.

В наработанной почве пласта d_4 разгрузка ближней к штреку области развивается до уровня появления растягивающих $\sigma_y = (0,04...0,25)\gamma H$, на расстоянии 15 – 25 м от штрека в глубь выработанного пространства, что свидетельствует о пучении разгруженной почвы, наблюдаемой в шахтных условиях. При движении в сторону штрека в основной и непосредственной почве под охранной конструкцией формируется концентрация сжимающих σ_y на уровне $(1,5...4)\gamma H$, которая распространяется в глубь до 4 м.

Непосредственно под выработкой образуется разгруженная область $\sigma_y = (0...0,5)\gamma H$ на всю ширину выработки и глубину до 7 – 9 м, которая намного обширнее, чем зона разгрузки в кровле. Со стороны нетронутого массива область опорного давления в почве достаточно ограничена (шириной до 7 м и глубиной до 2,7 м) со слабо выраженной концентрацией сжимающих σ_y .

Эпюра горизонтальных напряжений σ_x в углевмещающем массиве имеет следующие особенности. Благодаря повышенной деформативности угольного пласта d_4 и большой мощности основной кровли в областях над штреком и со стороны нетронутого массива значительных возмущений напряжений изгиба не наблюдается. Так, в непосредственной кровле (тоже немалой мощности $m_1^k = 3,7$ м) устанавливается относительно однородное поле сжимающих горизонтальных напряжений на уровне $\sigma_x = 12...18$ МПа, что соответствует концентрации 1,3 – 2 от уровня исходного (λH) негидростатического состояния массива. Исключение составляют приконтурные к штреку локальные области, где возникают небольшие растягивающие σ_x и концентрации сжимающих σ_x за счет более интенсивного изгиба непосредственной кровли.

В основной кровле, несмотря на ее большую мощность ($m_1^k = 18,8$ м), все же проявляются напряжения изгиба: на нижней поверхности песчаника возникают сжимающие σ_x до 20 – 22 МПа, а на верхней границе – растягивающие σ_x до 6 – 9 МПа; это свидетельствует о прогибе песчаника в направлении полости штрека. Тем не менее, значительная мощность песчаника существенно образом ограничивает проявления горного давления.

Вышепележащие менее мощные слои алевролита и пласта d_4^1 также не подвержены высоким градиентам изменения компоненты σ_x . Исключение составляет граничный слой песчаника, который в модели нагружается давлением 20 МПа – это проявляются, так называемые, краевые эффекты, которые имеют локальное распространение в пределах мощности граничного слоя и не вносят искажений в НДС системы в окрестности выемочного штрека.

Аналогично эпюре σ_y компонента σ_x также имеет локальные концентрации в угловых частях границы внутренней зоны полных сдвижений, которые носят местный характер и не оказывают влияния на процесс сдвижения надугольной толщи.

В выработанном пространстве четко проявляется разгрузка массива от горизонтальных напряжений. В зоне шарнирно-блокового сдвижения (за исключением локальных контактных напряжений) породные блоки испытывают небольшой изгиб только в первом ряду (примыкающем к поверхности полных сдвижений). В зоне беспорядочного обрушения устанавливается практически равномерное поле растягивающих σ_x , обусловленных поднятием почвы в выработанном пространстве. То же объяснение касается и достаточно равномерного поля растягивающих σ_x в породах непосредственной и верхнем слое основной почвы под выработанным пространством.

Со стороны нетронутого угольного пласта в породах почвы также устанавливается однородное поле сжимающих σ_x (за исключением приконтурных пород) на уровне 0,6 – 1 от исходного негидростатического поля нетронутого массива, что, как и ранее, обусловлено повышенной деформативностью пласта d_4 и защитными функциями мощной основной кровли.

Непосредственно под выемочным штреком наблюдаются растягивающие $\sigma_x = 1 \dots 8$ МПа, а форма их области указывает на перемещение пород непосредственной и основной почвы в полость штрека.

Завершающим этапом анализа НДС углевмещающего массива является исследование поля приведенных напряжений σ . Со стороны нетронутого массива наблюдается достаточно однородное поле $\sigma = 7 \dots 15$ МПа фактически по всей высоте ($y \approx 40$ м) модели. Над выемочным штреком в основной кровле приведенные напряжения возрастают, достигая максимума на границе с зоной шарнирно-блокового сдвижения; однако области, где может произойти разрушение песчаника, весьма ограничены и носят локальный характер.

В подработанной толще сформирована область разгрузки, особенно в первом ряду породных блоков и зоне беспорядочного обрушения, где σ не превышают 2 МПа. Во втором ряду породных блоков напряжение σ увеличивается до 5 – 10 МПа, что обусловлено снижением защитного эффекта со стороны консоли основной кровли.

В почве выработанного пространства также образуется зона разгрузки, где приведенные напряжения плавно возрастают с глубиной и удалением от выемочного штрека в диапазоне от 1 – 2 МПа до 9 – 14 МПа. Непосредственно под штреком в основной почве пласта d_4 расположена зона разгрузки до 2 – 7 МПа, которая распространяется по глубине на всю мощность песчаника ($m_2^{II} = 7,1$ м) основной почвы.

В целом, характер распределения поля напряжений σ_y , σ_x и σ соответствует современным представлениям о деформировании углевмещающего массива в окрестности выемочной выработки.

10.2.2. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРИКОНТУРНОМ ПОРОДНОМ МАССИВЕ ВЫЕМОЧНОГО ШТРЕКА

Оценка напряженно-деформированного состояния пород вблизи выемочного штрека представляет повышенный интерес, так как именно оно оказывает решающее влияние на формирование проявлений горного давления.

Вертикальные напряжения σ_y в приконтурных породах представлены эпюрой на рис. 10.4. Зона разгрузки кровли выработки имеет форму свода, смещенного в сторону выработанного пространства, что соответствует шахт-

ным наблюдениям. Небольшие растягивающие σ_y до 3 – 3,5 МПа образуют свод естественного равновесия высотой до 2,8 м и шириной до 5 м. Вертикальная нагрузка от веса пород внутри свода составляет 180 – 190 кН на раму при шаге 0,8 м установки крепи и является существенно меньшей несущей способности (470 кН) крепи КШПУ-20,3 из спецпрофиля СВП-27. Поэтому разупрочненные породы в кровле в пределах свода естественного равновесия не представляют опасности для крепи в целом и ее верхняка в частности.

В целом, возмущение σ_y в породах кровли до $0,4\gamma H$ распространяется на высоту до 5 м и ширину до 0,9 ширины выработки в проходке. Здесь действуют пониженные сжимающие σ_y , но даже в случае действия

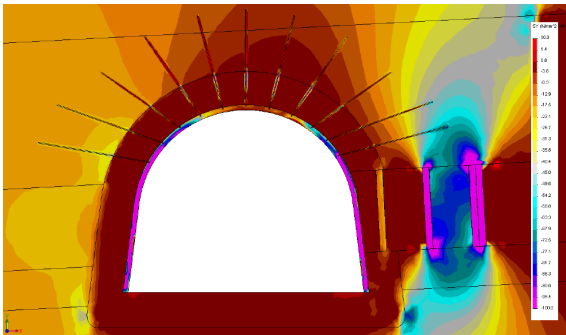


Рис. 10.4. Эпюра вертикальных напряжений σ_y в приконтурных породах выемочного штрека

разупрочняющих породу факторов нагрузка от веса пород этой зоны составит 350 – 400 кН, что также меньше максимальной несущей способности рамы. Поэтому по фактору действий вертикальных напряжений σ_y верхняк крепи КШПУ-20,3 находится в устойчивом состоянии, но оценка этого состояния будет продолжена по другим компонентам напряжений.

Следующая компонента напряжений подвергнутая анализу в приконтурных породах, горизонтальная σ_x . В близлежащих породах кровли σ_x являются сжимающими; в приконтурных разупрочненных породах $\sigma_x = 0 \dots 3,8$ МПа (до 0,4 от первоначального негидростатического состояния); выше разупрочненной зоны $\sigma_x = 3 \dots 20$ МПа, что составляет 0,3 – 2,2 от исходного состояния массива. Из этого следует, что за зоной разупрочненных пород наблюдается высокий градиент изменения сжимающих σ_x . Концентрация $\sigma_x = 15 \dots 20$ МПа наблюдается со стороны нетронутого массива и имеет форму неправильного свода, вытянутого в ту же сторону: высота – до 1,4 м, ширина – до 3,2 м. Данная концентрация опасности не представляет, так как растягивающих напряжений нет, а сжимающие σ_x гораздо меньше предела прочности алевролита на сжатие.

В целом, в непосредственной кровле сжимающие σ_x выше со стороны нетронутого угольного пласта, чем со стороны выработанного пространства, что объясняется малым горизонтальным сопротивлением обрушенных пород.

Заключительным этапом оценки состояния приконтурных пород кровли

является анализ приведенных напряжений σ , по которым исследуется устойчивость породы в области сжимающих напряжений по критерию прочности Кулона-Мора. В разупрочненных приконтурных породах образуется область разгрузки с напряжениями $\sigma = 1...3$ МПа. Выше этой области в пределах непосредственной кровли напряжение меняется от $\sigma = 4...9$ МПа со стороны выработанного пространства до $\sigma = 20...30$ МПа со стороны нетронутого угольного пласта, которые, однако, остаются меньше сопротивления сжатию алевролита. Со стороны нетронутого угольного пласта на границе с разупрочненной областью наблюдается локальная область высотой до 0,15 м и шириной до 2 м, где $\sigma = 32...37$ МПа и при сухих породах не вызывает их дальнейшего разупрочнения.

Таким образом, сжимающие σ_y напряжения недостаточны для разрушения приконтурных пород в кровле, а растягивающие σ_y образуют свод естественного равновесия, нагрузка от веса пород которого намного меньше несущей способности рамной крепи. Однако, интегральный показатель «несущая способность» требует уточнения в части анализа распределения напряжений непосредственно в рамной крепи.

Теперь оценим состояние приконтурных пород боков выработки так же по трем компонентам σ_y , σ_x и σ (см. рис. 10.4).

Вертикальное напряжение σ_y в боку штрека со стороны нетронутого угольного пласта характеризуется следующими особенностями:

- разупрочненные породы, непосредственно примыкающие к крепи, разгружены до уровня $\sigma_y = 1...4$ МПа, так как обладают значительной податливостью и находятся под защитой целостного массива;
- в целостных боковых породах возникают два локальных очага (до $1,1 \times 0,4$ м) концентрации $\sigma_y = 35...40$ МПа на уровне почвы выработки и расположения нижнего анкера;
- основной объем приконтурных боковых пород находится под действием $\sigma_y = 22...30$ МПа, то есть концентрация напряжений в зоне опорного давления невелика и составляет $(1,1...1,5)\gamma H$.

Со стороны выработанного пространства в боках выработки возникают такие высокие возмущения напряжений, которые требуют отдельного исследования при оценке работы жестко-податливой охранной конструкции.

При оценке эпюры распределения горизонтальных напряжений σ_x в боках выработки поступим аналогично и подвергнем анализу только приконтурные породы со стороны нетронутого угольного пласта (со стороны смежного выемочного участка). Здесь приконтурные разупрочненные породы малонагружены ($\sigma_x = 0...3,8$ МПа благодаря своей высокой деформативности) за исключением участка по длине стойки рамы небольшой толщины (до 0,2

м), где появляются растягивающие $\sigma_x = 0...3,8$ МПа, что обусловлено перемещением стойки рамы в полость выработки. В целостных боковых породах действуют $\sigma_x = 2...8$ МПа, то есть пониженной величины по отношению к исходному и негидростатическому состоянию. Небольшие растягивающие напряжения $\sigma_x = 0...3,8$ МПа по почве пласта вызваны изгибом непосредственной почвы до границы с разупрочненными породами.

Эпюра распределения приведенных напряжений σ в приконтурных боковых породах со стороны нетронутого угольного пласта характеризуется следующими особенностями:

- разупрочненные породы разгружены ($\sigma = 1...3$ МПа) благодаря своей высокой деформативности;

- в целостных боковых породах действуют напряжения $\sigma = 18...25$ МПа на ширину до 1,8 м, которые не могут вызывать дополнительное разрушение боковых пород; исключение составляет слабый пласт d_4 , который разупрочняется на указанную ширину.

Последним участком приконтурных пород вокруг выработки является ее почва, которая так же анализируется по трем компонентам σ_x , σ_y и σ .

Вертикальное напряжение σ_y в близлежащем слое почвы штрека характеризуется наличием обширной зоны разгрузки, которую можно разделить на две части (см. рис. 10.4):

- приконтурная область разупрочненных пород, где благодаря резко повышенной подвижности породы вертикальное напряжение σ_y минимально и изменяются от небольших сжимающих (до 1 – 2 МПа) до небольших растягивающих (до 1 МПа); породы этой области вносят существенный вклад в развитие пучения пород почвы;

- залегающая ниже (в основной почве) область разгрузки в целостном массиве выходит за пределы ширины выработки (8 – 8,5 м), по глубине распространяется до 7 – 9 м, которая является вторым фактором развития пучения пород почвы.

Внутри общей зоны разгрузки располагается область глубиной до 3 м, где σ_y изменяется от сжимающих 1 – 2 МПа до растягивающих 0 – 8 МПа и является одним из основных источников развития пучения пород почвы.

Эпюра горизонтальных напряжений σ_x в почве выработки отличается более плавным изменением их величины:

- в разупрочненной области непосредственно под выработкой действуют исключительно растягивающие σ_x , которым порода практически не сопротивляется, что является источником для развития пучения пород почвы;

- если в боковых частях указанной области растягивающие σ_x достигают 3 – 3,8 МПа, то в центральной зоне они увеличиваются до 6 – 7 МПа и однозначно провоцируют дальнейшее разрыхление породы;

– в нижележащем целостном массиве ярко проявляется его прогиб в полость выработки с образованием области растягивающих $\sigma_x = 4...10$ МПа практически по всей ширине выработки и глубиной до 1,1 м, где однозначно так же происходит разупрочнение породы; таким образом суммарная глубина разупрочнения пород почвы под выработкой достигает 2,1 м и является базой для проявлений пучения пород почвы выемочного штрека. Сохранение высоты штрека обеспечивается подрывкой почвы (после прохода лавы) на глубину 0,6 м, которая определяется как произведение глубины разупрочнения почвы на коэффициент ее разрыхления, согласно [58].

Приведенные напряжения σ , являясь интегральной характеристикой полей σ_x и σ_y , указывают на существование обширной зоны разгрузки в почве выработки, резко вытянутой вглубь. Поскольку в прилегающей области разупрочненных пород и под ней действуют в основном растягивающая σ_x и σ_y , то здесь величина приведенных напряжений минимальна ($\sigma = 1...5$ МПа). В боковых частях зоны разгрузки σ увеличивается до 10 – 15 МПа, что многократно меньше прочностных характеристик пород основной почвы и не представляет опасности для разупрочнения ее боковых частей.

10.3. ИССЛЕДОВАНИЕ И СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НДС ПРИКОНТУРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗНЫХ ТИПАХ КРЕПИ ВЫЕМОЧНОЙ ВЫРАБОТКИ

Рассмотрена задача – изучить целесообразность замены рамной крепи КШПУ-20,3 на другие, примерно, равные по площади поперечного сечения крепи, имеющие либо повышенную несущую способность, либо повышенный отпор в почве выработки. Анализ различных типов рамных крепей позволило становиться на двух конструкциях:

- кольцевая крепь КМК-4-24,5, обладающая повышенной несущей способностью благодаря своей форме;
- крепь КШПУ-20,3 с обратным сводом, обладающая повышенной реакцией отпора в почве выработки.

Конструкция крепи КШПУ-20,3 с обратным сводом приведена на рис. 10.5 в комплексе с системой анкеров и охранной конструкцией. Последние два элемента остаются постоянными для всех трех видов исследуемых крепей. Параметры крепи: площадь сечения в свету до осадки – 20,3 м², тип спецпрофиля СВП-27, рабочее сопротивление – 270 кН/арку, предельная несущая способность – 470 кН/арку [123].

Конструкция кольцевой крепи КМК-4 приведена на рис. 10.6 в совокупности с анкерами и охранной конструкцией. Параметры крепи: количество звеньев – 4, площадь сечения в свету до осадки – 24,5 м², тип спецпрофиля СВП-27, рабочее сопротивление – 300 кН/арку, предельная несущая способность – 489 кН/арку [123].

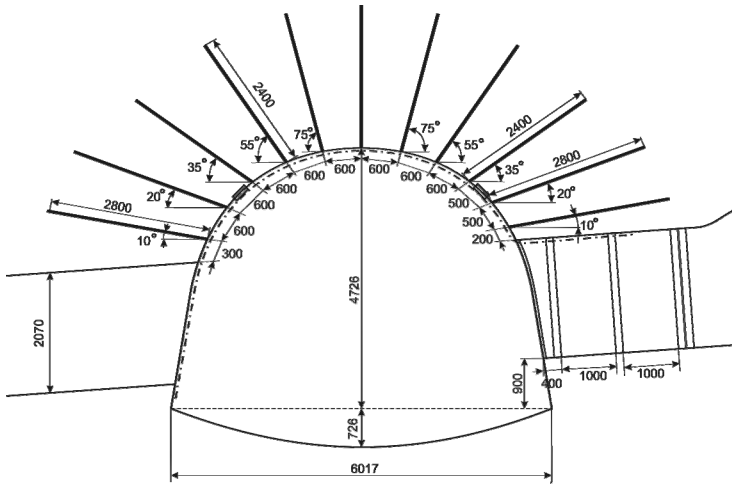


Рис. 10.5. Конструкция замкнутой комбинированной крепи КШПУ-20,3 с обратным сводом и анкерами

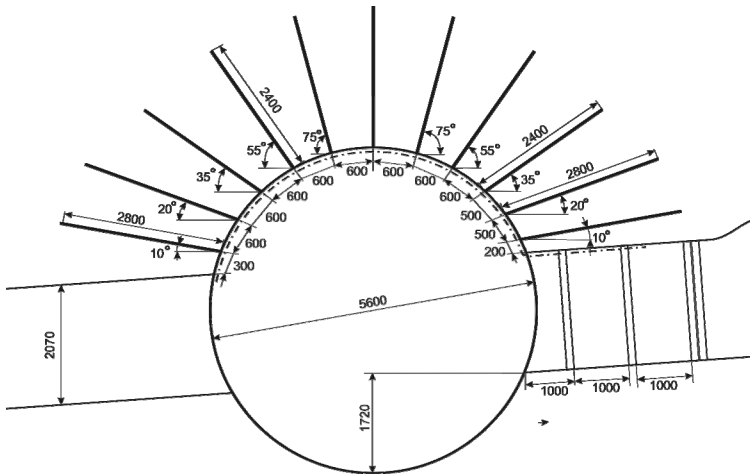


Рис. 10.6. Конструкция комбинированной кольцевой крепи КМК-4-24,5 с анкерами

Выбранные конструкции крепей сравниваются с базовой крепью КШПУ-20,3 (без обратного свода), которая применяется на шахте для крепления выемочных выработок.

Анализ НДС приконтурных пород предполагает исследование полей на-

пряжений: вертикальных σ_y , горизонтальных σ_x и приведенных σ . Методически анализ каждой компоненты напряжений выполнен в сравнении предлагаемых двух замкнутых конструкций крепей (см. рис. 10.5 и рис. 10.6) с базовой крепью КШПУ-20,3 (см. рис. 10.2).

Исследование и анализ вертикальных напряжений σ_y в замкнутых крепях выполнены по эпюрам, приведенным на рис. 10.7 (крепь с обратным сводом) и рис. 10.8 (кольцевая крепь). Эпюра σ_y в базовом варианте крепи КШПУ-20,3 представлена на рис. 10.4. В кровле выработки, независимо от вида крепи, образуется зона разгрузки в форме свода пониженных σ_y . Наименьшие размеры области с глубиной разгрузки (0,4...0,8) μH наблюдаются у выработки и крепи круглой формы: высота – до 3,3 м, ширина – до 4,6 м. Для крепи КШПУ-20,3 с обратным сводом высота зоны разгрузки составила 4,1 м, а ширина – до 5,5 м. В базовой крепи КШПУ-20,3 высота свода разгрузки достигает 4,5 м, ширина – 5,5 м. В указанной области разгрузки пород в кровле ближе к выработке образуется область предельного равновесия (также в виде свода), где появляются растягивающие σ_y , способствующие потере устойчивости данного породного объема. Здесь также минимальные размеры характерны для кольцевой крепи КМК-4-24,5: высота – до 1,9 м, ширина – до 3,4 м. Для крепи КШПУ-20,3 с обратным сводом высота – 2,2 м, ширина – 4,2 м; для незамкнутой (базовой) крепи КШПУ-20,3 соответственно высота – 2,0 м, ширина – 4,2 м.

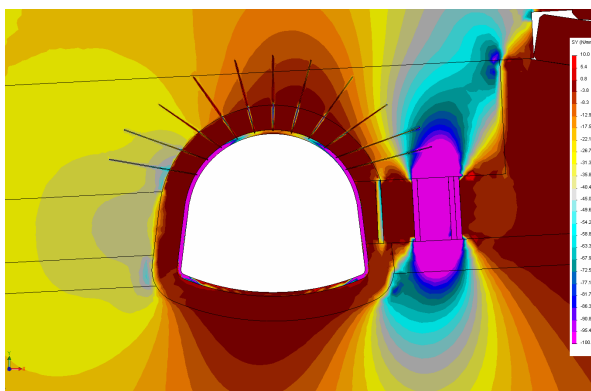


Рис. 10.7. Эпюра вертикальных напряжений σ_y в близлежащем массиве при установке комбинированной крепи КШПУ-20,3 с обратным сводом и анкерами

Таким образом, очевиден вывод: кольцевая крепь благодаря повышенной реакции отпора ограничивает область разгрузки на 16 – 27%, а свод естественного равновесия – на 5 – 18%; установка обратного свода в крепи КШПУ-20,3 незначительно влияет на размеры как зоны разгрузки в кровле, так и области неустойчивых пород. Второй вывод касается ограниченных размеров свода естественного равновесия, вес пород внутри которого многократно меньше несущей способности всех рассматриваемых видов крепей; поэтому данный фактор не является определяющим в процессе нагружения крепи и оценке ее устойчивости.

В боку выработки со стороны смежного выемочного участка (нетронутого угольного пласта) наблюдается следующая картина распределения вертикальных напряжений σ_y . В боку выработки образуется концентрация σ_y по отношению к исходному горному давлению γH , величина которой для более объективной и надежной оценки степени влияния формы выработки и типа крепи разделена на три интервала: $(1,8...2,2)\gamma H$, $(2,2...2,7)\gamma H$ и $(2,7...3,1)\gamma H$.

При сравнении крепи КШПУ-20,3 базовой и крепи КШПУ-20,3 с обратным сводом сколь-нибудь существенной разницы в эпорах σ_y не отмечается.

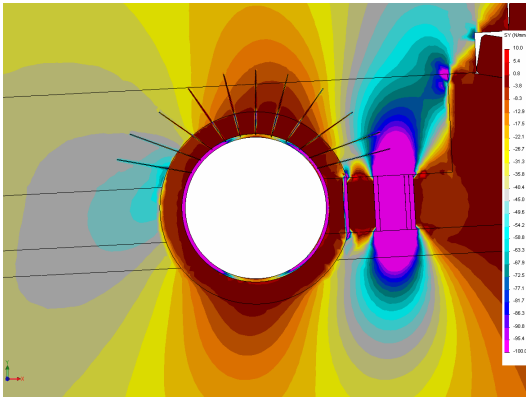


Рис. 10.8. Эпюра вертикальных напряжений σ_y в близлежащем массиве при установке кольцевой крепи КМК-4-24,5

Наибольшие отличия наблюдаются у кольцевой крепи КМК-4-24,5:

- интервал концентрации $\sigma_y = (1,8...2,2)\gamma H$ занимает область высотой более 12 – 15 м в сравнении с 5,0 м для крепей КШПУ-20,3; ширина области более 10 – 12 м в сравнении с 3,1 м для крепей КШПУ-20,3;

- более высокая концентрация $\sigma_y = (2,2...2,7)\gamma H$ распространяется на высоту до 3,4 м (против 0,9 м для КШПУ-20,3) и ширину до 3,0 м (против 0,2 м); для крепей серии КШПУ наблюдается только два локальных

очага данной величины концентрации σ_y , которые не представляют опасности для потери устойчивости боковых пород в целом;

- концентрация $\sigma_y = (2,7...3,1)\gamma H$ весьма ограничена по размерам – высота до 1,7 м и ширина до 0,4 м; в крепях КШПУ такого уровня напряжений не возникает вовсе.

Таким образом, кольцевая крепь КМК-4-24,5 провоцирует более высокое развитие опорного давления в боку выработки, что можно объяснить повышенной жесткостью кольца в боковом направлении в сравнении с арочной формой крепи КШПУ.

В почве выработки, также как и в кровле, образуется зона разгрузки независимо от вида крепи, что указывает на соответствие результатов моделирования сложившимся геомеханическим представлениям о характере НДС массива в окрестности выемочной выработки. Но, существуют отличия в поле σ_y для разных видов крепей. Так, для степени разгрузки $\sigma_y = (0,4...0,8)\gamma H$ размеры области установлены следующие:

– базовая крепь КШПУ-20,3 – глубина более 8 м, ширина – 7,8 м, что соответствует ширине выработки в проходке плюс ширина области разупрочненных приконтурных пород;

- крепь КШПУ-20,3 с обратным сводом – глубина 5,8 м, ширина 6,7 м;
- кольцевая крепь КМК-4-24,5 – глубина 3,4 м; ширина 5,0 м.

Ближе к контуру выработки сжимающие σ_y переходят в растягивающие, которые и являются главной причиной разупрочнения пород почвы. Области действия растягивающих σ_y также существенно отличаются для разных видов крепей:

- базовая крепь КШПУ-20,3 – глубина до 3,8 м, ширина – 7,8 м;
- крепь КШПУ-20,3 с обратным сводом – глубина до 3,1 м (0,81% от базовой крепи), ширина – 6,0 м (77%);
- кольцевая крепь КМК-4-24,5 – глубина до 1,8 м (47%), ширина – 4,4 м (56%).

Результаты расчетов убедительно свидетельствуют о том, что любая замкнутая крепь ограничивает область разупрочнения пород почвы и, соответственно, интенсивность пучения; в этом плане наиболее эффективна кольцевая крепь КМК-4, ограничивающая глубину разупрочнения пород почвы, более чем в два раза.

В целом, по фактору вертикальных напряжений σ_y , влияние вида крепи на НДС приконтурных пород оценивается неоднозначно: если в кровле отличия не столь существенны, то в боках кольцевая крепь КМК-4 провоцирует развитие более высокого опорного давления, а в почве более, чем в два раза ограничивает глубину разупрочнения пород.

Следующим этапом исследований является анализ поля распределения горизонтальных напряжений. Эпюра σ_x в приконтурных породах для указанных крепей сравнивались с базовой крепью КШПУ-20,3.

В кровле выработки за пределами разупрочненных приконтурных пород наблюдается асимметрия эпюры σ_x , практически стабильная для разных видов крепи. Так, со стороны смежного выемочного участка образуется концентрация сжимающих σ_x , в 1,5 – 3,0 раза превышающая начальные горизонтальные напряжения. Это свидетельствует об опускании породных блоков непосредственной кровли (алевролит), которые защемлены со стороны нетронутого массива. Аналогичное опускание в кровле происходит и со стороны выработанного пространства, что нагружает верхняк крепи. Этому процессу препятствуют анкера, так что перепады σ_x не так ярко выражены и практически не зависят от типа применяемой рамной крепи.

В боку выработки со стороны нетронутого массива наблюдается значительный градиент изменения σ_x по мере приближения к контуру выработки, который существенно зависит от вида применяемой рамной крепи. Это касается в основном участков контакта с угольным пластом, породами непо-

средственной почвы и в нижней части (высотой 0,5 – 0,8 м) приконтурных пород непосредственной кровли. Здесь наблюдается следующие тенденции:

– разгрузка 0,75 и более от начальных σ_x – ширина области 5,9 м для базовой крепи; 3,6 м (61% базовой крепи) для крепи КШПУ-20,3 с обратным сводом; 2,6 м (44%) для кольцевой крепи КМК-4-24,5;

– разгрузка 0,4 – 0,75 от начальных σ_x – ширина области 2,8 м для базовой крепи; 2,3 м (82%) для крепи КШПУ-20,3 с обратным сводом; 1,2 м (43%) для кольцевой крепи КМК-4-24,5;

– разгрузка 0 – 0,4 от начальных σ_x – ширина области 1,9 м для базовой крепи; 1,7 м (89%) для крепи КШПУ-20,3 с обратным сводом; для кольцевой крепи КМК-4-24,5 такая область разгрузки отсутствует.

Приведенные данные указывают, что замкнутые крепи, особенно кольцевой формы, существенно ограничивают ширину зоны разгрузки от напряжений σ_x , что объясняется повышенным их сопротивлением боковым нагрузкам.

В приконтурных породах почвы также наблюдаются существенные отличия поля σ_x для анализируемых видов крепи. Ширина области разгрузки в почве порядка 0 – 0,4 от начальных сжимающих σ_x выходит за пределы ширины выработки в проходке (7,8 м) для базовой крепи; для крепи КШПУ-20,3 с обратным сводом ширина зоны разгрузки составляет 4,4 м (56%), а для кольцевой крепи КМК-4-24,5 ширина области разгрузки сокращается до 1,7 м (22%).

При приближении к контуру выработки пониженные сжимающие σ_x переходят в растягивающие, которых, впрочем, не наблюдается для кольцевой крепи КМК-4-24,5. Интервал растягивающих $\sigma_x = 0...3,8$ МПа действует по ширине 6,0 м в базовой крепи; 3,3 м (55%) для крепи КШПУ-20,3 с обратным сводом. Более интенсивные растягивающие $\sigma_x = 3,8...7,5$ МПа действуют по ширине 3,4 м в базовой крепи и 1,0 м (29%) в крепи КШПУ-20,3 с обратным сводом.

Таким образом, обратный свод крепи КШПУ-20,3 резко ограничивает область расслоения пород почвы выработки от растягивающих σ_x , а кольцевая крепь вовсе исключает появление растягивающих σ_x . Следовательно, наиболее устойчивая почва (по фактору компоненты σ_x) имеет место при применении кольцевой крепи, которая сопротивляется пучению с максимальной реакцией.

Анализ НДС близлежащего к выработке углевмещающего массива выполнен также по эпюрам приведенных напряжений σ .

В кровле выработки стабильно наблюдается концентрация σ со стороны нетронутого массива и зона разгрузки со стороны выработанного пространства для всех исследуемых типов крепей. Наибольшая концентрация $\sigma = 70$ МПа возникает в непосредственной кровле при использовании кольцевой крепи, что обусловлено ее повышенной жесткостью при сопротивле-

нии косонаправленным нагрузкам. Для крепи КШПУ-20,3 с обратным сводом $\sigma_{max} = 55$ МПа, а для базовой крепи $\sigma_{max} = 38$ МПа. Если сравнивать σ_{max} с величиной сопротивления сжатию аргиллита обводненного $R_{об} = 30,6$ МПа и необводненного $R = 42$ МПа (по данным геологического прогноза шахты), то однозначно можно утверждать, что для крепей КШПУ-20,3 с обратным сводом и кольцевой крепи КМК-4-24,5 возникает область разупрочненных пород за пределами приконтурного массива. Размеры данной области разупрочнения зависят от типа применяемой рамной крепи, так как прослеживается тенденция увеличения концентрации приведенных напряжений с ростом сопротивления крепи косонаправленным нагрузкам со стороны нетронутого массива. Так, для крепи КМК-4-24,5 наблюдаются максимальные размеры области разупрочнения обводненной непосредственной кровли ($R_{об} = 30,6$ МПа): ширина до 2,6 м, высота 7,4 м, то есть область разупрочнения выходит за пределы высоты выработки. Для крепи КШПУ-20,3 с обратным сводом высота области разупрочнения соответствует высоте выработки (4,7 м), что составляет 64% от предыдущего варианта, а ширина разупрочнения достигает 2,1 м (81% от максимального значения). Еще меньше размеры области разупрочнения для базовой крепи, характеризующейся пониженным сопротивлением косонаправленным нагрузкам: высота – до 2,6 м (35%), ширина – до 1,1 м (42%).

Необходимый алевролит непосредственной кровли имеет более высокое сопротивление сжатию ($R = 42$ МПа), поэтому область разупрочнения для всех типов крепей более ограничена:

- кольцевая крепь КМК-4-24,5: высота – до 3,9 м, ширина – до 1,9 м;
- крепь КШПУ-20,3 с обратным сводом: высота – до 2,3 м (59%), ширина – до 1,2 м (63%);
- для базовой крепи зона разупрочнения сухого алевролита вообще отсутствует.

Размеры зоны разгрузки в кровле со стороны выработанного пространства также некоторым образом связаны с жесткостью конструкции крепи, поскольку эта зона располагается асимметрично относительно вертикальной оси выработки и здесь замкнутые крепи имеют существенно большее сопротивление косонаправленной нагрузке. Так, в наименее жесткой базовой крепи ширина зоны разгрузки развивается до 3,7 м, а высота – до 6,0 м, затрагивая песчаник основной кровли; для крепи КШПУ-20,3 с обратным сводом ширина зоны разгрузки сокращается до 2,4 м (65% от базовой крепи), а высота – до 4,4 м (73%); для кольцевой крепи КМК-4-24,5 ширина уменьшается до 2,0 м (54%), а высота остается прежней – 4,4 м (73%).

В почве выработки также образуется область разгрузки, которая имеет тенденцию к сокращению с увеличением реакции отпора крепи в направлении почвы. Более конкретно, для базовой крепи ширина зоны разгрузки выходит за пределы выработки и составляет 7,9 м, глубина распространения превышает 10 – 11 м; для крепи КШПУ-20,3 с обратным сводом ширина зоны разгрузки со-

кращается до 5,0 м (63%), а высота – до 3,6 м (менее 36%). Еще более уменьшаются размеры для кольцевой крепи КМК-4-24,5: ширина – до 2,0 м (25%), высота – до 1,5 м (менее 15%).

ВЫВОДЫ

1. Для повышения адекватности моделирования процесса сдвижения углевмещающей толщи в окрестности выемочного штрека осуществлено одновременное выполнение трех условий:

- пространственное моделирование пространственных объектов;
- отражение реальной структуры углевмещающей толщи с описанием ее механических свойств по полной диаграмме деформирования материала каждого элемента;
- максимально достоверное моделирование всех конструктивных особенностей крепи, охранной конструкции и свойств их материалов.

2. В соответствии с принятой методологией компьютерного моделирования пространственной системы «горный массив – охранная конструкция – крепь» обоснованы структура и свойства углевмещающей толщи пласта d_4

по полной диаграмме ее деформирования, наиболее объективно описывающей реальное состояние массива.

3. С учетом современных представлений о геомеханических процессах сдвижения надугольной толщи в выработанное пространство смоделированы структура и свойства зон шарнирно-блокового сдвижения и беспорядочного обрушения позади лавы.

4. Компьютерная модель рамно-анкерной крепи создана по условию максимально возможного отражения ее конструктивных особенностей.

5. Обоснованы предварительные параметры наиболее рациональной в данных горно-геологических условиях охранной конструкции с набором моделируемых механических характеристик ее основных элементов.

6. Тестирование разработанной модели доказало ее адекватность реальному объекту и непротиворечие существующим представлениям о геомеханических процессах в окрестности выемочных выработок.

7. Относительно однородное поле основных компонент напряжений со стороны нетронутого пласта обусловлено двумя факторами:

- повышенной деформативностью пласта d_4 при низких его прочностных характеристиках, что сглаживает концентрации напряжений в зоне опорного давления;
- мощным (18,8 м) и крепким песчаником основной кровли, не допускающим появления существенных напряжений изгиба вне зоны приконтурных к штреку пород.

8. В приконтурных породах кровли образуется свод естественного равновесия от действия вертикальных растягивающих напряжений σ_y . Однако, вес пород внутри свода примерно в 2,5 раза меньше несущей способности крепи КШПУ-20,3 из СВП-27, поэтому вертикальная нагрузка в кровле не может вызвать потерю устойчивости крепи.

9. Приконтурные породы боков штрека находятся в достаточно устойчивом состоянии благодаря своим прочностным характеристикам; исключение составляет пласт d_4 , где от напряжений сжатия разупрочнение угля развивается на ширину до 2,8 м.

10. В породах почвы под выработкой происходит их разупрочнение на глубину до 2,1 м, что является базой для проявления пучения определенной интенсивности и требует в перспективе после прохода лавы проведения подрывки глубиной не менее 0,6 м для сохранения необходимого по требованию эксплуатации остаточного сечения выемочного штрека.

11. По фактору распределения вертикальных напряжений σ_y наиболее разгруженным элементом рамной крепи является верхняк, что обусловлено так же густой сеткой армирования пород кровли анкерами. Наиболее нагружены стойки рамы с многократным чередованием направлений их изгиба, то в полость выработки, то в сторону массива. Наиболее опасен изгиб стойки со стороны выработанного пространства на уровне вынутаго пласта d_4 .

12. По фактору распределения горизонтальных напряжений σ_x наиболее нагруженным элементом является верхняк. Стойки рамы малонагружены компонентой σ_x , что наряду с высоким σ_y создает условия для пластического течения их материала (на отдельных участках) по теории прочности по максимальным касательным напряжениям.

13. Рамная крепь в целом недогружена за исключением отдельных локальных участков по ее контуру; поэтому целесообразна замена СВП-33 на более легкий тип спецпрофиля СВП-27, а снижение интенсивности напряжений на ограниченных участках пластического состояния стали Ст.5 достигается регулированием параметров установки анкеров и охранной конструкции.

Для повышения эффективности работы анкеров по формированию грузонесущей породной плиты над штреком целесообразно их рассредоточить в центральной части свода и сконцентрировать в боковых частях с увеличением длины до 2,8 м. Ограничение изгиба стойки рамы на уровне вынутаго угольного пласта выполняется с помощью податливой части охранной конструкции.

14. Литую полосу целесообразно возводить на расстоянии 1,2 – 1,5 м от контура выработки для исключения скола пород бермы и развития дополнительного пучения от опорного давления в почве пласта, вызванного литой полосой.

15. По результатам анализа НДС близлежащего массива при разных типах рамной крепи в составе комбинированной, например, 5-го конвейерного штрека очевиден главный вывод – замкнутые крепи, имеющие повышенное сопротивление в боках и почве выработки, провоцируют рост напряженного состояния (увеличиваются концентрации напряжений, уменьшаются размеры областей разгрузки) в близлежащем породном массиве, что предопределяет увеличение нагрузки на крепь. В этом плане единственным позитивным моментом является сокращение области действия и величины растягивающих напряжений в почве, характеризующих процесс ее пучения.

11. ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ПРИКОНТУРНЫХ ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРОД СБОРНОГО УКЛОНА №200 ПЛАСТА l_6^{H-2} ШАХТЫ «ДОЛЖАНСКАЯ-КАПИТАЛЬНАЯ»

11.1. ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОТРАБОТКИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА l_6^{H-2}

Характеристика трещиноватости горных пород. Замеры трещиноватости производились в породах кровли угольного пласта l_6^{H-2} , которыми охвачены как очистные, так и подготовительные выработки пласта в пределах технических границ шахтного поля.

Анализ результатов изучения трещиноватости и элементов залегания пород, полученных методом акустического каротажа, позволил выделить на оцениваемой площади три системы трещин с углами падения $60 - 75^\circ$.

I система ориентирована на северо-запад ($A_3 - 10 - 360^\circ$) Указанные средние значения элементов трещин этой системы близки элементам залегания сбросов. Трещины этой системы параллельны сбросам или же близки к их направлению. Трещины данной системы не характерны для песчаных сланцев. Трещины большей частью выполнены кварцитом, открытость трещин колеблется в пределах $0,1 - 5,0$ мм. Расстояние между трещинами изменяется в пределах от $0,10$ до $0,8$ м. Для песчаников расстояние между трещинами выдержано и составляет $0,05 - 0,2$ м. Для сланцев изменяется в более широких пределах $0,1 - 0,5$ м. Поверхность трещин шероховатая.

II система трещин. Трещины этой системы параллельны (или близки к этому направлению, та как ориентированы на юг) относительно трещин I системы, но имеют противоположный угол падения по азимуту ($A_3 - 150 - 120^\circ$). Характеристика трещин этой системы аналогична трещинам I основной системы, различие – в разнонаправленных углах падения.

III система. Углы падения пород на востоке изменяются от 2 до 50° . Основное направление падения пород характеризуется азимутами $180 - 230^\circ$. Трещины закрытого типа. В песчаниках трещины наблюдаются повсеместно и повторяются через $0,1 - 0,6$ м.

Из изложенного следует:

1. В сланцах глинистых, песчано-глинистых и песчаных трещиноватость выражена слабо и отмечается на отдельных изолированных участках. Поверхность трещин ровная или шероховатая. Трещины в основном закрытого типа и сухие.

2. В песчаниках трещиноватость выражена четко и повсеместно.
3. С увеличением глубины частота, открытость и распространенность трещин уменьшается.

Крепость и устойчивость боковых пород. Пласт I_6^{H-2} в пределах поля действующей шахты «Должанская-Капитальная» является одним из производительных рабочих пластов с выдержанной рабочей мощностью.

На неотработанной части поля шахты, примерно, на 70% площади в кровле пласта I_6^{H-2} залегают сланцы глинистые, преимущественно малой мощности от 0,08 до 0,40 м, реже до 1,0 – 4,0 м и, образующие в основном неподхватываемую ложную кровлю, в меньшей степени – частично подхватываемую. В крайней южной, северной и восточной частях шахтного поля прослеживаются русловые размывы шириной от 10 до 450 м, протяженностью до 3 км, представленные песчаниками мощностью от 8 до 36 м, часто трещиноватыми. На остальной части в кровле залегают сланцы алевритово-аргиллитовые и глинистые, перемежающиеся по площади неравномерно. В сланцах определяются части включения окальцинированной и углефицированной флоры.

Вмещающие породы угольного пласта I_6^{H-2} характеризуются низкой пористостью, довольно высокими прочностными параметрами: коэффициентом сцепления и средним значением угла внутреннего трения.

Непосредственная кровля прогнозируется по блокам следующим образом: Центральный блок – среднеустойчивая; Южный блок – преимущественно устойчивая, реже среднеустойчивая; Западный блок – в основном среднеустойчивая, перемежающаяся с неустойчивой и устойчивой.

Основная кровля представлена, главным образом, прочными песчаниками мощностью от 0,7 до 42 м и сланцами алевритовыми мощностью 2,5 – 27,0 м. В центральном блоке ожидается в большой степени труднообрушающаяся кровля, реже средне- и легкообрушающаяся; в Южном блоке – трудно- и среднеобрушающаяся в равных пропорциях; в Восточном блоке также в основном труднообрушающаяся, перемежающаяся по площади с легко- и среднеобрушающейся.

Непосредственная почва на значительной площади сложена сланцами алевритовыми комковатой текстуры, среднеустойчивыми. На южном крыле, главным образом, в пределах Восточного блока породы почвы представлены глинистыми разностями, редко алевритовыми, сильнотрещиноватыми, с зеркалами скольжения, местами перемятыми ($\sigma_{сж} = 70 \cdot 10^5 - 250 \cdot 10^5$ Па), неустойчивыми, с низкой сопротивляемостью вдавлению стоек.

На большей части оцениваемой площади в почве пласта проявляется пучение после проведения очистных работ, а в южной части Восточного блока – и до очистных работ. В целом по площади интенсивность пучения возрастает в восточном направлении.

Песчаники в кровле выработки составляют 25 – 30% и представлены всеми типами структур от мелко- до крупнозернистых, местами гравийных с включением галек, с разнообразными текстурами: косослоистой однонаправленной и перекрестной, волнистой и линзовиднослоистой, массивной и разной степени выраженности.

Песчаники плотные (2,56 – 2,84 г/см²), мелкопористые (0,42 – 6,5%), прочные ($\sigma_{сж}$ от 319 до $2137 \cdot 10^5$ Па), с высокими динамическими модулями упругости (от 2,2 до $9,47 \cdot 10^{10}$ Па, от 1,64 до $6,30 \cdot 10^{10}$ Па), обладают высокой абразивностью ($K_{абраз}$ – 1,72), категория по буримости VII – X.

Сланцы алевролитовые наиболее распространены среди углевмещающих пород. Они мелко и крупнозернистые, песчаные, преимущественно кварцевые, с горизонтальной, волнистой линзовиднослоистой, с включением флоры хорошей сохранности, с конкрециями пирита и сидерита, с линзами угля. Цемент в основном хлоридно-гидрослюдистый, сидерито-гидрослюдистый.

Сланцы алевролитовые обладают также высокой плотностью (2,4 – 2,88 г/см²), низкой пористостью (0,15 – 17,7%), но меньшей прочностью по сравнению с песчаниками ($330 - 1075 \cdot 10^5$ Па). Модули упругости составляют – $1,59 - 5,88 \cdot 10^{10}$ Па, $0,63 - 5,32 \cdot 10^{10}$ Па, коэффициент абразивности – 1,2, категория по буримости VI – X.

Сланцы глинистые и алевролитово-глинистые близки по своему составу и свойствам и отличаются от алевролитовых почти черной окраской, обусловленной обугленным мелким растительным детритом, тонкогоризонтальной, часто скрытослоистой текстурой, проявляющейся в плитчатом расколе породы.

Известняки наиболее распространены в кровле пласта, незначительно в его восточной части. Известняки серые и темно-серые, преимущественно беспорядочной, микро- тонкозернистой структуры. Известняки плотные (2,55 – 2,82 г/см³), малопористые (1,5 – 3,98%), прочные ($10 - 1295 \times 10^5$ Па), высокоабразивные ($K_{абраз}$ – 0,95), категория по буримости VII – IX.

Сланцы известковые менее всего представлены в углевмещающих породах. Как правило, они темно-серые, с волнистой горизонтальной слоистостью, чаще прерывистой. Основная масса гидрослюдистая. Известковые сланцы

близки по своим свойствам к известнякам, но имеют меньшую прочность (от 395 до $1175 \cdot 10^5$ Па), плотность их изменяется от 2,69 до 2,81 г/см³, пористость 1,68 – 5,1%, коэффициент абразивности составляет 0,5, категория по буримости VII.

Минимальные значения прочности соответствуют литологическим разностям зоны выветривания, или, имеющим комковатую структуру, а также повышенную трещиноватость в зонах тектонических нарушений.

Зона выветривания горных пород по геологоразведочным работам составляет в среднем 40 м и с пониженной на 30 – 50% своей прочностью. Так, например, песчаники, залегающие на глубине 500 м, имеют $\sigma_{сжс} = 1080 – 1900 \cdot 10^5$ Па, а на глубине 40 м – от 200 до $450 \cdot 10^5$ Па. Породы здесь имеют более светлую окраску с охристыми пятнами ожелезнений, сланцы легко расслаиваются на плитки.

В качестве объекта исследований использован сборный уклон №200. Сводная литологическая колонка по исследуемой выработке приведена на рис. 11.1.

Расчет напряженно-деформированного состояния приконтурного породного массива выполнен с учетом физико-механических характеристик угля и вмещающих пород, приведенных в табл. 11.1, согласно для глубины разработки $H = 800$ м и мощности угольного пласта $m = 1,1$ м.

Таблица 11.1

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРОВЛИ
И ПОЧВЫ УЧАСТКА ПЛАСТА I_6^{H-2}**

Вмещающие породы	Наименование пород	Удельный вес, кН/м ³	Объемный вес, кН/м ³	Предел прочности на сжатие, МПа			Угол внутреннего трения	Коэффициент сцепления
				в естественном состоянии	во влагонасыщенном состоянии	% снижения прочности		
Основная кровля	Сланец песчаный	28,0	27,3	69,6	57,6	17	40	23,2
Непосредственная кровля	Сланец песчано-глинистый	27,4	26,8	54,3	–	–	50	18,2
Непосредственная почва	Сланец глинистый	27,5	27,2	45,8	66,7	18	37	13,6
Основная почва	Сланец песчаный	28,6	27,3	86,4	72,6	16	38,5	24,2

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГОЛЬНОГО ПЛАСТА l_6^{H-2}

Описание угольного пласта	Марка угля	Объемный вес, кН/м ³	Угол падения пласта, град	$\sigma_{сж}$, МПа	Опасность			Склонность к самовозгоранию	Сопротивляемость угля резанию, кН/м
					по взрывчато-сти пыли	по горным ударам	по внезапным ударам		
Уголь черный, блестящий, излом полураковистый, трещиноват. Трещины местами заполнены кальцитом. В угольном пласте имеются твердые включения колчедана	А	16-23	2-5	42	не опасен	не опасен	не опасен	196	

Характеристика состава и свойств вмещающих пород выемочного участка приведена по данным описания пород в горных выработках и описания керна геологоразведочных скважин, их минералого-петрографического изучения, а также по результатам лабораторных исследований физико-механических свойств пород.

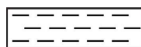
11.2. ПОСТРОЕНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СБОРНОГО УКЛОНА №200

По данным геологической разведки и паспорта проведения сборного уклона №200 построена геомеханическая модель взаимодействия системы «массив – крепь», в которой отражены ее основные особенности.

Во-первых, смоделирована реальная структура породного слоистого массива, вмещающего угольный пласт l_6^{H-2} . Мощности трещиноватых породных слоев кровли и почвы пласта l_6^{H-2} переменны по длине выработки, поэтому приняты к исследованию их усредненные (в некоторой степени) значения, соответствующие геологической структуре в районе скважины U3828. По данным паспорта проведения сборного уклона №200 в кровле пласта не наблюдается четкого разделения на основную и непосредственную, за исключением периодически встречающейся «ложной» кровли незначительной мощности 0,18 – 0,20 м, представленной глинистым сланцем, которая несущественно влияет на геомеханические процессы в окрестности выработки. В силу указанных факторов смоделирована реальная структура кровли без разделения на основную и непосредственную:



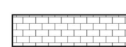
Условные обозначения:



Сланец песчаный



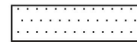
Сланец глинистый



Известняк



Сланец песчано-глинистый



Песчаник



Уголь

Рис. 11.1. Литологическая колонка по сборному уклону №200

– *первый* (над угольным пластом l_6^{H-2}) породный слой кровли мощностью $m_1^K = 12,8$ м представлен песчано-глинистым сланцем (в нижней части слоя) мощностью 3,5 м с сопротивлением сжатию $\sigma_{сж1}^K = 50,6...54,2$ МПа и песчаным сланцем (в верхней части слоя) с сопротивлением сжатию $\sigma_{сж1}^K = 78...97$ МПа;

– *второй* породный слой кровли мощностью $m_2^K \geq 16,5$ представлен песчаником с сопротивлением сжатию $\sigma_{сж2}^K = 94...127,2$ МПа.

Угольный пласт l_6^{H-2} смоделирован мощностью $m^y = 0,95$ м с сопротивлением сжатию $\sigma_{сж}^y = 10...20$ МПа.

В непосредственной почве залегают:

– глинистый сланец мощностью $m_1^{\Pi} = 4,35$ м с сопротивлением сжатию $\sigma_{сж1}^{\Pi} = 15,6...20,8$ МПа;

– песчано-глинистый сланец мощностью $m_2^{\Pi} = 0,6$ м с сопротивлением сжатию $\sigma_{сж2}^{\Pi} = 50,6...54,2$ МПа;

– угольный пласт l_6^{H-1} мощностью $m_3^{\Pi} = 0,6$ м с сопротивлением сжатию $\sigma_{сж3}^{\Pi} = 10...20$ МПа.

В основной почве залегают:

– песчаный сланец мощностью $m_4^{\Pi} = 6,75$ м с сопротивлением сжатию $\sigma_{сж4}^{\Pi} = 82,3...91$ МПа;

– песчаник мощностью $m_5^{\Pi} \geq 10$ м с сопротивлением сжатию $\sigma_{сж5}^{\Pi} = 108...112$ МПа.

Во-вторых, смоделированы реальные размеры выработки, крепи и параметры ее размещения относительно угольного пласта:

– угол падения пласта принят $\alpha = 4^\circ$;

– сборный уклон №200 проведен с комбинированной подрывкой – кровли на 0,5 м, почвы на 1,65 м;

– типовое сечение выработки площадью в свету до осадки $11,2 \text{ м}^2$ с крепью КМП-А3-11,2;

– построена реальная геометрия спецпрофиля СВП-22;

– плотность установки рамной крепи – 1,25 рам/м;

– материал спецпрофиля – сталь Ст.5 с пределом текучести $\sigma_T = 270$ МПа,

модулем упругости $E^P = 21 \cdot 10^4$ МПа, коэффициентом Пуассона $\mu^P = 0,3$;

– межрамное ограждение – железобетонная затяжка стандартного размера $800 \times 200 \times 50$ мм с механическими характеристиками $\sigma_{сж}^3 = 20$ МПа, $E^3 = 2 \cdot 10^4$ МПа, $\mu^3 = 0,2$;

– закрепное пространство шириной 150 мм, забутованное разрушенной породой с механическими характеристиками: $E^{зab} = 50$ МПа, $\mu^{зab} = 0,25$.

НДС построенной модели системы рассчитано для глубины расположения выработки $H \approx 800$ м.

11.3. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ НДС ТРЕЩИНОВАТОГО ПОРОДНОГО МАССИВА В ОКРЕСТНОСТИ ВЫЕМОЧНОЙ ВЫРАБОТКИ

11.3.1. ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ПОРОД КРОВЛИ ВЫРАБОТКИ

В кровле выработки образуется зона разгрузки от действия вертикальных напряжений σ_y с появлением растягивающих σ_y до 2,5 МПа на контуре выработки. Форма зоны разгрузки сводообразная, симметричная относительно оси и вытянутая по координате Y : ее размеры при двукратной величине разгрузки ($\sigma_y = 0,5\gamma H$) составляют 2,8 – 3 м по высоте и 3,5 – 4 м по ширине выработки. Зона разгрузки полностью локализуется в первом породном слое кровли, а уровень действия сжимающих σ_y таков, что не вызывает разрушения от напряжений сжатия даже в песчано-глинистом сланце, залегающем в нижней части первого породного слоя кровли.

Однако в приконтурных породах кровли появляются также растягивающие σ_y , которым горные породы сопротивляются очень слабо, особенно, если учитывать их нарушенность как естественной трещиноватостью, так и искусственной, образованной при проведении выработки. Поэтому в кровле образуется область неустойчивых пород, склонных к вывалообразованию. Размеры этой области (от действия σ_y) оценена по условию $\sigma_y = 0$: высота зоны неустойчивых пород – 1,0 – 1,3 м, ширина – 2,1 – 2,4 м.

Относительно небольшие размеры области неустойчивых пород позволяют нейтрализовать это негативное проявление горного давления как минимум двумя способами:

– упрочнить, например, трубчатыми анкерами, развивающими достаточную несущую способность даже в частично разупрочненных породах и при значительной их податливости;

– изменить форму свода крепи выработки, уменьшив ширину и увеличив

высоту свода, например, с помощью крепи КВТ-2; это повышает устойчивость приконтурных пород кровли.

Эпюра горизонтальных напряжений σ_x иллюстрирует прогиб породных слоев кровли в полость выработки, однако из-за довольно большой мощности первого породного слоя кровли ($m_1^K = 12,8$ м) напряжения изгиба не столь существенно сказываются на его устойчивости. Тем не менее, в районе замка свода образуется локальная область разупрочненных пород от действия растягивающих σ_x : высота – 0,5 – 0,6 м; ширина – 0,7 – 0,9 м. Указанные размеры области возможного вывалообразования меньше, чем таковые от действия растягивающих вертикальных напряжений σ_y , однако совокупность действия растягивающих σ_x и σ_y при учете естественной и искусственной нарушенности приконтурных пород кровли позволяют прогнозировать область возможного вывалообразования в кровле шириной, соответствующей ширине выработки в проходке, а высотой до 1,5 – 2,0 м. Предупредить возможный вывал пород в кровле целесообразно, на наш взгляд, двумя указанными выше способами.

11.3.2. ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ПОРОД В БОКАХ ВЫРАБОТКИ

Эпюра вертикальных напряжений σ_y однозначно указывает на формирование в боках выработки зоны опорного давления. Она сосредоточена в основном в первом породном слое почвы угольного пласта m_1^I по всей высоте подрывки с концентрацией $\sigma_y \geq 2\gamma H$ в районах опор стоек и верхнего конца их прямолинейной части; ширина областей с $\sigma_y \geq 2\gamma H$ не превышает 0,4 – 0,6 м в боках выработки. Однако, залегающий в почве угольного пласта глинистый сланец, имеет низкое сопротивление сжатию (до 20,8 МПа) и возможно его разупрочнение в боках выработки на более значительное расстояние. Например, $\sigma_y = (1,25 \dots 1,5)\gamma H = 27,5 \dots 30$ МПа вполне способные вызвать разупрочнение глинистого сланца, распространяются на ширину до 3 м с каждой стороны выработки. Аналогичные особенности имеют место и в угольном пласте I_6^{H-2} , сопротивление сжатию которого также не превышает 20 МПа.

Эпюра горизонтальных напряжений σ_x указывает на интенсивный изгиб первого породного слоя почвы угольного пласта, в котором расположены бока выработки. На контакте с угольным пластом действуют растягивающие напряжения σ_x до 5 МПа, разрушающие верхнюю часть слоя глинистого сланца на ширину до 1,5 – 1,8 м. В районе опор стоек рамной крепи концентрация сжимающих σ_x шириной до 1,2 – 1,6 м также способна вызвать ра-

зупрочнение глинистого сланца.

В зоне опорного давления по бокам выработки действуют преимущественно сжимающие напряжения σ_y и σ_x , совместное действие которых в геомеханических исследованиях принято оценивать по величине приведенных напряжений σ и сравнивать по теории прочности Кулона-Мора с сопротивлением сжатию того или иного породного слоя или угольного пласта. В этой связи показательна эпюра приведенных напряжений σ , анализ которой указывает на обширные области предельного состояния в боках выработки первого породного слоя почвы угольного пласта (ширина до 3,1 – 3,4 м) и в угольном пласте l_6^{H-2} (ширина до 2,8 – 3,0 м). Такие значительные области предельного состояния массива провоцируют не только интенсивное боковое перемещение стоек рамы, но и развитие пучения пород почвы непосредственно в выработке.

В качестве мероприятий по повышению устойчивости боков выработки следует рекомендовать применение трубчатой анкерной крепи, деформационно-силовая характеристика которой сочетает возможность значительной податливости (на сотни миллиметров) без существенной потери несущей способности (до 150-200 кН) при установке даже в разупрочненных породах. Анкера с помощью гибких стяжек соединяются со стойками рамы в единую грузонесущую конструкцию, обладающую высокой реакцией сопротивления боковым нагрузкам наряду со значительной податливостью, позволяющей рамно-анкерной крепи «уходить» от чрезмерных боковых нагрузок.

11.3.3. ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ПОРОД ПОЧВЫ ВЫРАБОТКИ

Эпюра вертикальных напряжений σ_y указывает на формирование в почве выработки более обширной, чем в кровле зоны разгрузки, которая распространяется на всю ширину выработки, а по глубине напряжения $\sigma_y = 0,5\gamma H$ достигают породного слоя основной почвы, то есть интенсивная разгрузка действует на глубине не менее 4 м от контура почвы выработки. Также больше, чем в кровле область действия растягивающих напряжений σ_y , соответствующая ширине выработки, а по глубине распространяющаяся до 1,3 – 1,4 м. Эти границы оконтуривают область разупрочненных пород в почве выработки от действия растягивающих вертикальных напряжений.

На эпюре горизонтальных напряжений σ_x особенно четко прослеживается прогиб в полость выработки первого породного слоя почвы: в приконтурных породах почвы выработки действуют растягивающие напряжения σ_x до 5 МПа и более, а на границе с песчано-глинистым сланцем возникают сжимающие напряжения $\sigma_x \geq 10$ МПа.

Анализируя полученные данные можно сделать два вывода. С одной стороны, глубина разупрочненных пород от действия растягивающих напряжений σ_y и σ_x относительно невелика и не провоцирует развитие значительного пучения почвы выработки. С другой стороны, в боках выработки деформируется обширная зона разупрочненных пород, которые «выдавливаются» более жесткими и целостными слоями кровли в полость выработки, в том числе и по направлению горизонтальных перемещений породы под опорами стоек рамной крепи, преобразующихся в наклонные и вертикальные перемещения ближе к середине почвы выработки.

Второй фактор может оказать решающее воздействие, особенно в зоне влияния очистных работ, когда расширяется область действия и усиливается величина опорного давления в боках выработки. Кроме того, слабый глинистый сланец в непосредственной почве очень чувствителен к увлажнению и его сопротивление сжатию существенно снижается. При этом порода почвы будет разупрочняться от действия не только растягивающих, но и сжимающих напряжений σ_y и σ_x , а размеры этой области существенно возрастут и приведут к интенсификации развития пучения пород почвы выработки.

ВЫВОДЫ

1. Приконтурные породы вокруг проводимой выемочной выработки разупрочняются на разную глубину по всему ее периметру.

2. В кровле выработки образуется зона неустойчивых пород, склонных к вывалообразованию на глубину 1,0 – 1,3 м и ширину 2,1 – 2,4 м. При действии ослабляющих факторов естественной и искусственной нарушенности массива высота вывала может достигать 1,5 – 2,0 м.

3. Предотвратить вывалообразование рекомендуется одним из двух способов:

– упрочнение приконтурных пород кровли, например, трубчатыми анкерами, развивающими высокую несущую способность, в том числе и в разупрочненных породах;

– устанавливать взамен крепи КМП-А3-11,2 крепь КВТ-2-11,7 с уменьшенной шириной и увеличенной высотой свода, форма которого повышает устойчивость пород кровли.

4. В боках выработки образуется обширная область предельного состояния массива: в угольном пласте l_6^{H-2} шириной до 2,8 – 3,0 м, в первом породном слое почвы шириной до 3,1 – 3,4 м. Это обуславливает развитие значительных боковых перемещений приконтурных пород с повышенной боковой нагрузкой на стойки рамной крепи.

5. Повышение устойчивости боков выработки рекомендуется осуществлять путем формирования рамно-анкерной крепи при установке анкеров в боках выработки и их соединения со стойками рамы гибкими стяжками.

6. В почве выработки глубина разупрочненных пород достигает 1,3 – 1,4 м и занимает всю ее ширину. При возможном увлажнении глинистого сланца его сопротивление сжатию уменьшается в 2 – 3 раза и зона разупрочненных пород может расширяться на всю мощность первого породного слоя почвы. Этот фактор совместно с обширной зоной предельного состояния пород в боках выработки интенсифицирует пучение почвы выработки.

12. ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ПРИКОНТУРНЫХ ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРОД 75-го ВОСТОЧНОГО КОНВЕЙЕРНОГО ШТРЕКА ПЛАСТА K_5^1 ШАХТЫ «КРАСНЫЙ ПАРТИЗАН»

12.1. ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОТРАБОТКИ ПЛАСТА K_5^1

В породах кровли пласта K_5^1 , которыми охвачены как очистные, так и подготовительные выработки пласта в пределах технических границ поля шахты выделено три системы трещин.

I основная система. Азимут падения – 109° , азимут простирания – 9° , угол падения – 66° . Под I основной выделена система наиболее распространенных трещин, которые встречаются на шахтном поле. Средние значения элементов трещин этой системы близки элементам залегания Партизанского и Черновицкого сбросов и параллельны этим сбросам или же близки к этому направлению. Азимут падения трещин изменяется в пределах $145 - 90^\circ$, а угол падения – $40 - 88^\circ$. Трещины данной системы не характерные для сланцев глинистых. Здесь они встречаются очень редко, обычно закрытые, необводненные. В сланцах песчаных и особенно в песчаниках трещиноватость выражена четко и повсеместно. Трещины большей частью заполнены кварцитом, открытость трещин колеблется в пределах $0,05 - 3,0$ мм. Для песчаников расстояние между трещинами более выдержано и составляет $0,1 - 0,3$ м. Для сланцев изменяется в более широких пределах $0,1 - 0,6$ м. Частота трещин возрастает вблизи сбросов и составляет $5 - 10$ штук на 1 п/м. Вблизи сбросов увеличивается и открытость трещин (от $0,05 - 0,1$ мм до $0,5 - 1,0$ мм). Трещины обычно заполнены кварцем молочно-белого цвета, поверхность трещин шероховатая. Вблизи сбросов трещины обводнены (наблюдается водоприток порядка $6 - 7$ м³/час). С глубиной открытость и обводненность трещин уменьшаются.

II система. Трещины этой системы ориентированы перпендикулярно трещинам I основной системы по азимуту падения $0 - 42^\circ$ с углами падения $45 - 90^\circ$. Средние значения: азимут падения – 20° , угол падения – 67° . Трещины данной системы в сланцевой толще (сланцы глинистые, песчано-глинистые и песчаные) отмечаются только на отдельных изолированных участках и повторяются через $0,10 - 0,8$ м. Трещины закрытого типа. В песчаниках трещины наблюдаются повсеместно и повторяются через $0,15 - 0,6$ м. Обычно заполнены кварцем при открытости трещин в $0,1 - 1,0$ мм.

III система трещин. Трещины этой системы параллельны (или близки к этому направлению) относительно трещин I основной системы, но имеют противоположный угол падения по азимуту $235 - 310^\circ$. Средние значения элементов трещин этой системы: азимут падения – 269° , угол падения – 66° .

Характеристика трещин этой системы аналогична трещинам I основной системы, различие – в разнонаправленных углах падения.

Из вышеизложенного следует:

1. В сланцах глинистых, песчано-глинистых и песчаных трещиноватость выражена слабо и отмечается на отдельных изолированных участках. Поверхность трещин ровная или шероховатая. Трещины в основном закрытого типа и сухие.

2. В песчаниках трещиноватость выражена четко и повсеместно. Наблюдаются трещины двух взаимно перпендикулярных систем. Третью систему можно приравнять к I основной, но с обратным (противоположным) углом падения. Поверхность трещин шероховатая, реже – бугристая. Трещины часто заполнены кварцем при открытости первых от 0,1 до 3,0 мм. Расстояние между трещинами – 0,1 – 0,5 м.

3. Трещины всех трех систем, особенно в песчаниках, при глубинах до 300 м по вертикали влажные, а вблизи сбросов обводнены. С глубиной обводненность падает, и при глубине минус 500 м забои выработок сухие.

4. С увеличением глубины частота, открытость и распространенность трещин уменьшается, что подтверждается уменьшением общешахтного притока воды по шахте.

Крепость и устойчивость боковых пород. Пласт K_5^1 в пределах поля действующей шахты «Красный Партизан» является одним из производительных рабочих пластов с выдержанной рабочей мощностью. На всей отработанной части шахтного поля пласт характеризуется двухпачечным строением: верхняя пачка мощностью 0,40 – 0,45 м в восточной и центральной частях поля и 0,30 – 0,35 м – в западной части поля; прослой мощностью 0,07 – 0,08 м представлен преимущественно сланцем глинистым, реже – сланцем песчано-глинистым и сланцем песчаным; нижняя пачка с мощностью 0,80 – 0,85 м в восточной и центральной частях поля и 0,75 – 0,80 м – в западной части поля.

Вмещающие породы угольного пласта характеризуются низкой пористостью, довольно высокими прочностными параметрами, коэффициентом сцепления и средним значением угла внутреннего трения.

Залегают угольный пласт в сланцевой толще. В пределах горных работ в непосредственной кровле пласта в восточной и частично в центральной частях поля залегают сланцы песчаные мощностью 7-20 м. В центральной части и на крайнем западе шахтного поля в непосредственной кровле пласта отмечаются сланцы песчано-глинистые. Сланцы глинистые отмечаются в виде полосы шириной до 1600 м, протягивающейся по падению пласта на расстоянии 300 – 1000 м от западной границы шахтного поля.

Песчаные и песчано-глинистые сланцы непосредственной кровли в горных выработках устойчивые, сланцы глинистые – среднеустойчивые. Существенное влияние на устойчивость пород кровли в очистных выработках оказывают мелкоамплитудные нарушения в зонах, влияния которых приводит к обрушению кровли. Межслоевые передвижки и кливаж пород, которые на поле шахты получили широкое развитие, также снижают устойчивость пород кровли и способствуют образованию ложной кровли. Следует отметить, что какой-либо закономерности в проявлении ложной кровли по площади угольного пласта не установлено. Выделяются отдельные небольшие площадки и приурочены главным образом к верхним горизонтам. Слабая устойчивость непосредственной кровли характерна для зон частичного размыва пласта и замещения сланцевой толщи в этих местах песчаником. Песчаник в этих зонах с прожилками и прослоями угля до 1 – 5 см, которые значительно снижают его устойчивость. Зоны эти прослеживаются в виде узких (шириной 10 – 25 м) полос.

В непосредственной кровле угольного пласта в границе оценки прослеживаются в основном сланцы песчаные. Сланцы песчано-глинистые отмечаются только в центральной и западной частях шахтного поля.

Основная кровля пласта устойчивая и представлена песчаными сланцами и песчаниками.

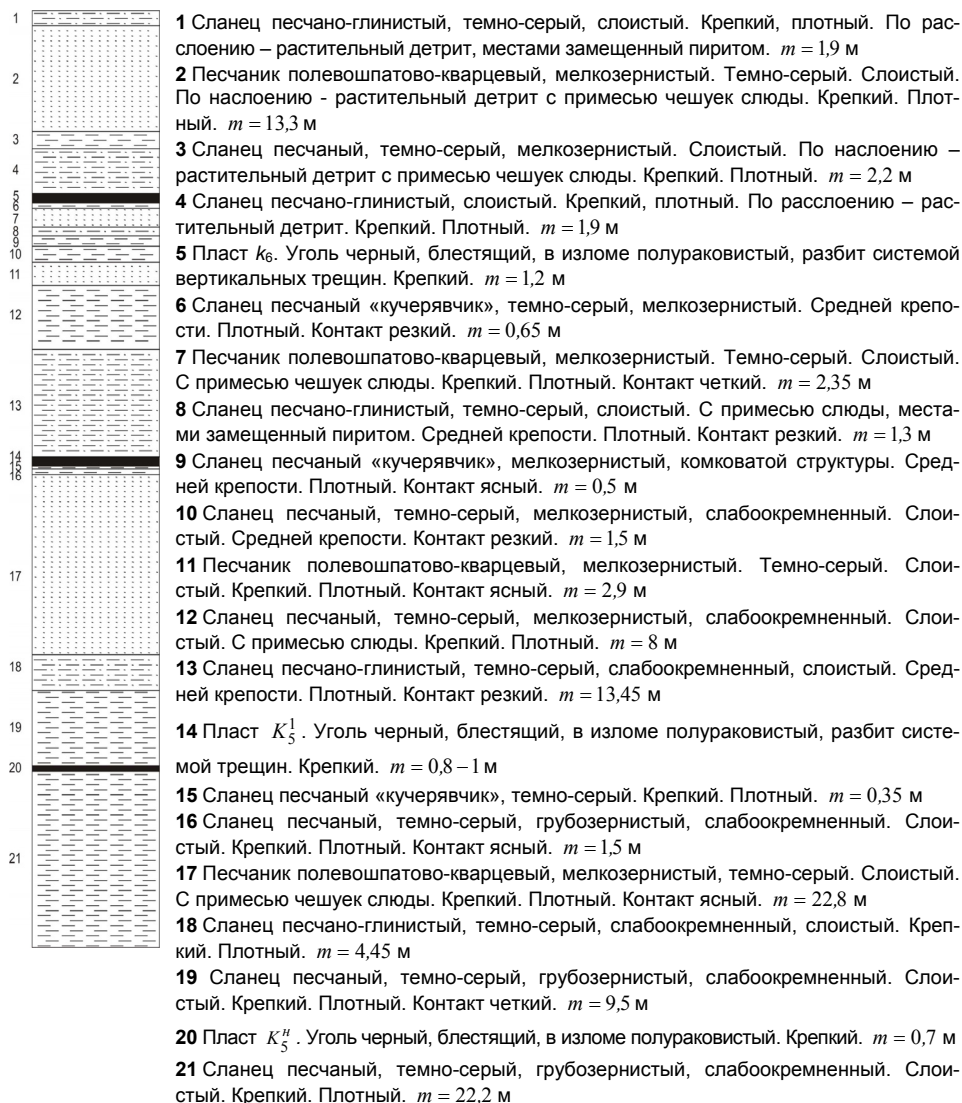
Местами в почве отмечаются маломощные слои глинистых сланцев, возможны проявления ложной почвы. Ложная почва пласта представлена песчаными сланцами комковатой текстуры («кучерявчик») с коэффициентом крепости $f = 7$.

Непосредственная почва характеризуется как устойчивая. В очистных выработках иногда отмечается слабое ее пучение. Непосредственная почва пласта почти на всей площади отсчета запасов представлена песчаными сланцами мощностью 1,0 до 22,2 м. В северо-восточной части участка между угольным пластом и непосредственной почвой намечаются сланцы глинистые мощностью 0,10 – 0,50 м.

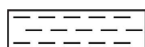
В основной почве пласта отмечается чередование песчанистых сланцев и песчаников.

Сводная литологическая колонка по исследуемой выработке приведена на рис. 12.1.

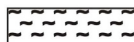
Расчет напряженно-деформированного состояния породного массива выполняется по данным физико-механических характеристик угля и вмещающих пород, приведенных в табл. 12.1, согласно для глубины разработки $H = 1300$ м и мощности угольного пласта $m = 1,15$ м.



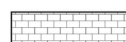
Условные обозначения:



Сланец песчаный



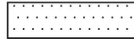
Сланец глинистый



Известняк



Сланец песчано-глинистый



Песчаник



Уголь

Рис. 12.1. Литологическая колонка по 75 восточному конвейерному штреку

Таблица 12.1

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРОВЛИ И ПОЧВЫ
УЧАСТКА ПЛАСТА K_5^1 НА ГОРИЗОНТЕ 1300 м**

Литологический состав	$\sigma_{сж}$, МПа	f породы по Протодьяконову	Объемный вес, кН/м ³	Коэффициент пластичности	Предел текучести, МПа	Угол внутреннего трения, град.	Коэффициент сцепления
Основная кровля. Сланцеватый алевролит, слюдистый, слоистый, с включением растительных остатков. Трещиноватый, с наличием резких контактов по слоям	68	8	28	1,49	88	38	127
Непосредственная кровля. Сланцеватый аргиллит, слоистый, слюдистый с отпечатками фауны. Встречаются зоны замещения аргиллита алевролитом	60,5	7	28	1,18	88	32	130
Непосредственная почва. Алевролит, темно-серый перемятый с отпечатками стеблей растений комковатой текстуры «кучерявчик», склонен к пучению ниже по слою плотный, массивный, однородный, слюдистый	58	6	27	1,2	72	38	134
Основная почва. Песчаник полевошпатово-кварцевый, темно-серый, кремнистый, переслаивается с кварцевым сливным. Мелкозернистый, слоистый. Крепкий, плотный, контакт ясный.	95	10	27,5	1,23	130	37	142

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГОЛЬНОГО ПЛАСТА K_5^1

Описание угольного пласта	Марка угля	Объемный вес, кН/м ³	Угол падения пласта, град.	$\sigma_{сж}$, МПа	Опасность			Склонность к самовозгоранию	Сопротивляемость угля резанию, кН/м
					по взрывчатости пыли	по горным ударам	по внезапным ударам		
Уголь черный, блестящий, излом полураковистый, трещиноват. Трещины местами заполнены кальцитом. В угольном пласте имеются твердые включения колчедана, пирита	A	18-22	2-8	45	не опасен	не опасен	не опасен	190	

12.2. ПОСТРОЕНИЕ, ОБОСНОВАНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЫЕМОЧНОЙ ВЫРАБОТКИ

В разработанной модели ось « Y » расположена по вертикальной оси симметрии выработки, а ось « X » совпадает с нижней границей модели. По высоте размер тестовой модели составляет $Y = +30$ м; по ширине: правая граница $X = +15$ м, левая граница $X = -15$ м. С точки зрения вмещающих выработку пород в модель включены: угольный пласт K_3^1 двухпачечного строения; два породных слоя непосредственной кровли; первый породный слой и частично второй слой основной кровли; угольный пласт – спутник K_3^2 , разделяющий основную и непосредственную кровли; два породных слоя непосредственной почвы; частично один породный слой основной почвы.

Анализ поля напряжений в тестовой модели установил следующее. Вертикальные напряжения σ_y на верхней границе модели распределены практически равномерно с колебаниями не более 8,9% по отношению к величине нетронутого массива $\gamma H = 32$ МПа. На нижней границе модели $\gamma H = 32,8$ МПа колебания σ_y по координате X несколько превышают 10% только на участке 2,5 – 3 м под выработкой. Но, поскольку глубина зоны разгрузки в почве составляет менее половины глубины модели в почве, то адекватность отражения процесса пучения почвы не нарушена. На боковых границах модели по координате Y колебания σ_y (по отношению к нетронутому состоянию) не превышают 8,2%. Исключение составляют локальные концентрации σ_y по поверхностям напластования породных слоев и угольных пластов (до $1,52 \gamma H$), обусловленные появлением контактных напряжений при совместной деформации разнородных (по механическим свойствам) породных слоев и угольных пластов.

Горизонтальные напряжения σ_x полностью стабилизируются (отклонения до 3,5%) только на нижней границе модели и равны $\lambda \gamma H = 10,9$ МПа (нетронутого породного массива). На верхней и боковых границах тестовой модели наблюдаются более существенные колебания σ_x (в сравнении с $\lambda \gamma H$), что объясняется возникновением дополнительных напряжений σ_x от прогиба породных слоев в полость выработки и не противоречит классическим положениям механики твердого деформируемого тела. Эти возмущения σ_x никоим образом не сказываются на поле напряжений в окрестности выемочного штрека, т.к. связаны с краевыми эффектами закрепления модели (размеры 30×30 м) и имеют локальные области, максимумы которых достигают: на левой границе – до 0,7 м, на верхней границе – до 1,3 м, на правой границе – до 4,7 м.

Касательные напряжения τ_{xy} имеют возмущения в окрестности выработки на глубину до 8 м, а на границах модели практически исчезают, что обусловлено малым углом падения угольного пласта ($\alpha = 6 - 8^\circ$) и по этой причине несущественной разницей между векторами главных напряжений σ_1 , σ_2 и векторами напряжений σ_y , σ_x .

Приведенные напряжения σ являются производной от компонент σ_y , σ_x и τ_{xy} , поэтому имеют аналогичные тенденции колебаний на границах модели.

В итоге анализ поля напряжений в тестовой модели позволяет утверждать, что ее размеры 30×30 м в поперечном сечении выемочного штрека вполне достаточны для достоверного описания процесса сдвижения близлежащего породного массива (рис. 12.2).

Механические характеристики углевмещающего массива приняты по данным геологических изысканий (табл. 12.1) и каталогам [85, 124].

Угольный пласт K_5^1 моделируется двухпачечного строения с усредненными (по длине выработки) по мощности значениями: нижняя пачка – 0,8 м; прослойк песчано-глинистого сланца – 0,12 м; верхняя пачка – 0,38 м. Механические характеристики: уголь – модуль деформации $E^y = 0,35 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu^y = 0,35$, угол внутреннего трения $\varphi^y = 30^\circ$, предел прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}^y = 12$ МПа; прослойк из песчано-глинистого сланца – $E^{np} = 2,7 \cdot 10^4$ МПа, $\mu^{np} = 0,25$, $\varphi^{np} = 32^\circ$, $\sigma_{сж}^{np} = 60,5$ МПа.

Породные слои кровли и почвы по длине выемочных участков имеют существенно переменную мощность. Поэтому выполнено моделирование структуры углевмещающей толщи в двух, крайне отличающихся между собой сечениях – в начале (вариант 1) и посередине (вариант 2) проектируемых выемочных участков. Остальные варианты структур будут занимать проме-

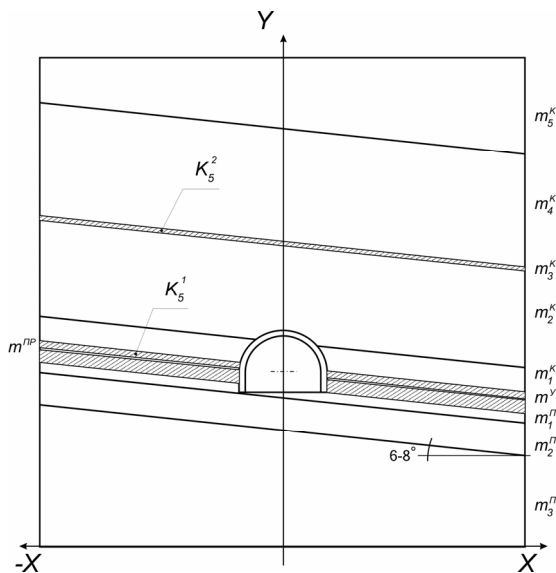


Рис. 12.2. Геомеханическая модель слоистого углевмещающего массива в окрестности выемочного штрека

жуточное значение, также как и результаты их моделирования.

Вариант №1 (см. рис. 12.2):

– $m_5^K \geq 8,0$ (в реальных условиях породный слой более мощный, но принятая высота модели его ограничивает), $E_5^K = 5,3 \cdot 10^4$ МПа, $\mu_5^K = 0,25$, $\varphi_5^K = 37^\circ$, $\sigma_{сж5}^K = 85$ МПа;

– $m_4^K = 7,0$ м, $E_4^K = 2,7 \cdot 10^4$ МПа, $\mu_4^K = 0,25$, $\varphi_4^K = 35^\circ$, $\sigma_{сж4}^K = 50$ МПа;

– $m_3^K = 0,2$ м – угольный пропласток K_5^2 с теми же механическими характеристиками, что и угольный пласт K_5^1 ;

– $m_2^K = 6,0$ м, $E_2^K = 2,7 \cdot 10^4$ МПа, $\mu_2^K = 0,25$, $\varphi_2^K = 35^\circ$, $\sigma_{сж2}^K = 70$ МПа;

– $m_1^K = 1,5$ м, $E_1^K = 2,7 \cdot 10^4$ МПа, $\mu_1^K = 0,25$, $\varphi_1^K = 35^\circ$, $\sigma_{сж1}^K = 45$ МПа;

– $m_1^{\Pi} = 0,35$ м, $E_1^{\Pi} = 2,9 \cdot 10^4$ МПа, $\mu_1^{\Pi} = 0,25$, $\varphi^{\Pi} = 32^\circ$, $\sigma_{сж1}^{\Pi} = 65$ МПа;

– $m_2^{\Pi} = 2,0$ м, $E_2^{\Pi} = 2,7 \cdot 10^4$ МПа, $\mu_2^{\Pi} = 0,25$, $\varphi^{\Pi} = 32^\circ$, $\sigma_{сж2}^{\Pi} = 65$ МПа;

– $m_3^{\Pi} \geq 10$ м (в реальных условиях породный слой более мощный, но принятые размеры модели по высоте его ограничивают), $E_3^{\Pi} = 5,3 \cdot 10^4$ МПа, $\mu_3^{\Pi} = 0,25$, $\varphi_3^{\Pi} = 37^\circ$, $\sigma_{сж3}^{\Pi} = 100$ МПа.

Вариант №2 (см. рис. 12.2):

– $m_5^K \geq 8,0$ (в реальных условиях породный слой более мощный, но принятая высота модели его ограничивает), $E_5^K = 5,3 \cdot 10^4$ МПа, $\mu_5^K = 0,25$, $\varphi_5^K = 37^\circ$, $\sigma_{сж5}^K = 85$ МПа;

– $m_4^K = 3,5$ м, $E_4^K = 2,7 \cdot 10^4$ МПа, $\mu_4^K = 0,25$, $\varphi_4^K = 35^\circ$, $\sigma_{сж4}^K = 50$ МПа;

– $m_3^K = 0,3$ м – угольный пропласток K_5^2 с теми же механическими характеристиками, что и угольный пласт K_5^1 ;

– $m_2^K = 0,6$ м, $E_2^K = 2,7 \cdot 10^4$ МПа, $\mu_2^K = 0,25$, $\varphi_2^K = 35^\circ$, $\sigma_{сж2}^K = 70$ МПа;

– $m_1^K = 9,5$ м, $E_1^K = 2,7 \cdot 10^4$ МПа, $\mu_1^K = 0,25$, $\varphi_1^K = 35^\circ$, $\sigma_{сж1}^K = 45$ МПа;

– $m_1^{\Pi} = 0,35$ м, $E_1^{\Pi} = 2,9 \cdot 10^4$ МПа, $\mu_1^{\Pi} = 0,25$, $\varphi^{\Pi} = 32^\circ$, $\sigma_{сж1}^{\Pi} = 65$ МПа;

– $m_2^{\Pi} = 0,7$ м, $E_2^{\Pi} = 2,7 \cdot 10^4$ МПа, $\mu_2^{\Pi} = 0,25$, $\varphi^{\Pi} = 32^\circ$, $\sigma_{сж2}^{\Pi} = 65$ МПа;

– $m_3^{\text{II}} \geq 10$ м (в реальных условиях породный слой более мощный, но принятые размеры модели по высоте его ограничивают), $E_3^{\text{II}} = 5,3 \cdot 10^4$ МПа, $\mu_3^{\text{II}} = 0,25$, $\varphi_3^{\text{II}} = 37^\circ$, $\sigma_{\text{сжз}}^{\text{II}} = 100$ МПа.

Угол падения пласта K_3^1 и породных слоев в модели принят одинаковым и равным $\alpha = 6^\circ$.

Следующим этапом обоснования геомеханической модели является оценка параметров выемочного штрека, его крепи, межрамного ограждения и закрепного пространства.

Расположение выемочного штрека относительно угольного пласта моделируется в общем случае с его верхней и нижней подрывкой как наиболее часто применяемый вариант с точки зрения эффективной перегрузки угля с забойного конвейера на скребковый конвейерного штрека. Высота $h_{\text{нод}}$ нижней подрывки со стороны лавы обычно не превышает 1,1 м на шахте «Красный партизан». Результаты анализа НДС системы «трещиноватые породы-крепь выработки» показывают, что максимальные отклонения до 13,6% для указанной величины подрывки приходится на приведенные напряжения в районе прямолинейной части стойки рамной крепи. Но, для усредненной величины подрывки $h_{\text{нод}} = 0,55$ м отклонения σ будут в пределах допустимых значений. Поэтому принято в моделях системы $h_{\text{нод}} = 0,55$ м со стороны лавы (левая стойка), тогда опора правой стойки рамы будет совпадать с плоскостью почвы угольного пласта.

Размеры выработки и крепи определяются паспортом ее проведения в соответствии с [125].

Выемочный штрек проводится арочной формы со сводом, близким к циркульному, его размеры (по паспорту) в проходке: шириной – 5200 мм, высота 3660 мм. Здесь необходимо учесть следующий фактор. В проектах проведения выемочных штреков предусмотрена ширина закрепного пространства 50-70 мм, в то время, как шахтные наблюдения показывают перебор сечения по контуру выработки до 200 мм. Поэтому, для адекватного отражения реальных условий принимаем ширину выработки в проходке 5450 мм, а ее высоту в проходке – 3800 мм. Размеры выработки в свету до осадки: площадь сечения 12,8 м², ширина 4750 мм, высота 3430 мм.

Крепь выработки – рамная металлическая податливая трехзвенная КМП-А3-13,8 из спецпрофиля СВП-27 устанавливается вдоль выработки с шагом $L = 0,5$ м. Спецпрофиль СВП изготавливается из стали Ст.5 [93] с механическими характеристиками: расчетный предел текучести $\sigma_T = 270$ МПа, модуль упругости $E_{\text{II}}^p = 21 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu^p = 0,3$.

Межрамное ограждение выемочного штрека комбинированное: в кровле – железобетонная затяжка, в боках – деревянная. Железобетонная за-

тяжка моделируется с реальными параметрами [38]: длина – 500 мм, ширина – 200 мм, толщина 50 мм, предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}^3 = 20$ МПа, модуль деформации $E^3 = 2 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu^3 = 0,2$. Деревянная затяжка характеризуется параметрами: длина – 500 мм, ширина – 200 мм, толщина – 25 мм, предел прочности на сжатие (при изгибе) $\sigma_{сж}^3 = 70$ МПа, модуль деформации $E^3 = 1,1 \cdot 10^4$ МПа.

Закрепное пространство по контуру выработки заполняется (в соответствии с паспортом проведения выработки) забутовочным материалом (кусками породы от проходки) для выравнивания нагрузки на крепь. Деформационные характеристики породной забутовки приняты в соответствии с работами [101, 119, 120, 126]: модуль деформации забутовки $E^{3ab} = 30$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu^{3ab} = 0,25$.

Таким образом, реализованы все требования повышения достоверности моделирования геомеханических процессов в окрестности выемочного штрека.

На этапе адаптации геомеханической модели проведено ее тестирование для подтверждения адекватности результатов расчета НДС системы «трещиноватые породы – крепь выработки» процессам сдвижения слоистой углевмещающей толщи. На наш взгляд, наиболее наглядно прослеживается непротиворечие модели «классическим» положениям механики горных пород и механики подземных сооружений на примерах эпюр вертикальных σ_y и горизонтальных σ_x напряжений.

Эпюра σ_y тестовой модели достаточно четко указывает на существование областей разгрузки в кровле и почве выемочного штрека и области опорного давления в ее боках, которые постепенно «размываются» при отходе от выработки в глубь массива. В близлежащих породах кровли и почвы выработки сжимающие σ_y переходят в растягивающие, что интенсифицирует процесс разрушения приконтурных пород, которое проявляется через вывалообразование кровли и пучение почвы. В боках выработки концентрация σ_y превышает в 1,5 – 2 раза γH нетронутого массива и также провоцирует разупрочнение этой области. Закрепное пространство благодаря большой деформативности забутовочного материала находится в относительно разгруженном состоянии и выравнивает нагрузку по контуру крепи. В самой рамной крепи наиболее нагруженными напряжениями σ_y являются стойки, а менее – свод рамы, что вполне объясняется передачей всей вертикальной нагрузки, обуславливающий известный факт действия в них интенсивного изгибающего момента, нередко приводящего к пластическим деформациям и разрушению крепи.

Эпюра горизонтальных напряжений σ_x наглядно указывает на действие изгибающих моментов в каждом породном слое в окрестности выработки. В соответствии с классическими представлениями прогибы слоев (в направлении полости выработки) порождают дополнительные горизонтальные напряжения σ_x :

- в кровле выработки растягивающие σ_x появляются в нижних слоях, а сжимающие σ_x – в верхних слоях, как это и имеет место при смещении пород кровли в полость выработки;

- в почве выработки растягивающие σ_x появляются в верхних слоях, что указывает на перемещение пород почвы в полость выработки;

- в боках выработки четко выражена зона опорного давления, в которой меняется знак кривизны изгиба слоев: непосредственно на контакте с выработкой растяжение происходит в нижних слоях, а на расстоянии нескольких метров растяжение наблюдается в верхних слоях.

Максимумы σ_x на границе каждого породного слоя сильно зависят от его мощности и расстояния от выработки: чем больше мощность слоя и более удален от выработки, тем меньше максимумы σ_x на его поверхностях.

В рамной крепи наиболее интенсивно изгибающий момент от действия разнознаковых σ_x проявляется в своде и направление действия изгибающего момента указывает на прогиб свода рамы в полость выработки.

В целом следует отметить, что все указанные особенности НДС системы «трещиноватые породы-крепь выработки» хорошо согласуются с известными исследованиями [67, 68, 92, 115, 116, 127, 128], что еще раз доказывает достаточную адекватность разработанной модели реальным геомеханическим процессам в окрестности выемочного штрека.

12.3. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ НДС ВМЕЩАЮЩИХ ВЫЕМОЧНУЮ ВЫРАБОТКУ ТРЕЩИНОВАТЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Для детального и углубленного анализа НДС системы «трещиноватый массив-крепь выработки» целесообразно, на наш взгляд, разделить исследования на четыре основных позиции:

- НДС кровли выемочного штрека призвано оценить ее устойчивость с точки зрения прогнозирования процесса вывалообразования;

- НДС приконтурных пород в боках выработки для определения размеров области нарушенных пород, создающих боковую нагрузку на крепь;

- НДС почвы выемочного штрека для оценки ее устойчивости на предмет прогнозирования пучения;

- определение зон нарушенных пород вокруг выемочного штрека.

12.3.1. ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ПОРОД КРОВЛИ ВЫЕМОЧНОГО ШТРЕКА

В начале исследования анализируются общие черты эпюр компонент напряжений двух моделей (в начале и посредине выемочных участков) с существенно различной структурой углевмещающей толщи, а затем отмечаются их отличия.

В кровле выработки четко прослеживается зона разгрузки эпюры вертикальных напряжений σ_y сводообразной формы, что в определенной мере подтверждает известную гипотезу свода проф. М.М.Протоdjяконова. В верхней части свода действуют небольшие сжимающие напряжения σ_y до 3 – 5 МПа, которые переходят в растягивающие σ_y до 2 – 6 МПа в средней и нижней части свода. Отличие двух моделей заключается в том, что при увеличенной мощности первого породного слоя непосредственной кровли размеры свода уменьшаются. Это объясняется повышенной жесткостью слоя m_1^K по варианту 2, что снижает его прогиб в полость выработки и, соответственно, величину σ_y .

Также обращает внимание стабильно действующая для обеих моделей зона концентрации σ_y по угольному пропластку K_5^2 , разделяющему основную и непосредственную кровли. Эта концентрация σ_y действует в плоскости напластования K_5^2 по обе стороны от вертикальных границ выработки. Кроме того, концентрация σ_y выходит за пределы мощности угольного пропластка K_5^2 как в сторону породного слоя m_4^K основной кровли, так и в сторону породного слоя m_2^K непосредственной кровли на глубину 0,4 – 1,1 м. Здесь необходимо учитывать три обстоятельства. *Первое* – концентрация $\sigma_y = 45...60$ МПа обусловлена низкими деформационными характеристиками угольного пропластка K_5^2 , которые интенсифицируют прогибы слоев основной кровли, нагружающие слои непосредственной кровли. *Второе* – прочностные характеристики угольного пропластка ($\sigma_{сж3}^K = 12$ МПа) в несколько раз меньше величин концентраций σ_y , что приводит к его разрушению и еще большему прогибу породных слоев основной кровли. *Третье* – прочностные характеристики породного слоя m_2^K ($\sigma_{сж3}^K = 70$ МПа) несколько превышают максимумы σ_y , однако и здесь возможно частичное разупрочнение массива из-за действия факторов реологии и структурного ослабления. Кроме того,

во второй модели (вариант 2) из-за малой мощности слоя $m_2^K = 0,6$ м концентрация σ_y слегка затрагивает (до 0,5 м) породный слой m_1^K , у которого $\sigma_{сж1}^K = 45$ МПа и здесь также наблюдается частичное разрушение породного слоя m_1^K .

Выявленные особенности распределения σ_y в породах непосредственной кровли позволяют спрогнозировать увеличение во времени нагрузки на свод рамной крепи из-за увеличения прогиба породных слоев основной кровли при частичном или полном разрушения массива в районе угольного пропластка K_5^2 .

Горизонтальные напряжения σ_x (помимо начальных негидростатических условий $\sigma_x = \lambda\gamma H$) зависят от деформаций прогиба породных слоев кровли (в первую очередь непосредственной) в полость выработки. В породных слоях непосредственной кровли максимумы σ_x располагаются в районе вертикальной оси выработки (в нижних плоскостях слоя – растяжение, в верхних – сжатие) и под углом $30 - 40^\circ$ к плоскости напластования, где кривизна прогиба слоев меняет знак (в верхних плоскостях – растяжение, в нижних – сжатие). Уровень растягивающих напряжений σ_x в слоях непосредственной кровли таков (в области действия максимумов $\sigma_x = 10...15$ МПа), что обязательно вызывает разрушение породы в этих областях. Появление в районе максимумов σ_x так называемых квазипластических шарниров в породных слоях непосредственной кровли увеличивает их податливость, их прогиб возрастает, так же как и нагрузки на свод рамной крепи.

Величина растягивающих напряжений σ_x в приконтурных породах кровли в несколько раз выше их прочности на разрыв, что обуславливает неременное разрушение некоторой области пород. Но, во второй модели величина и область концентрации σ_x гораздо меньше, поскольку больше жесткость слоя в кровле из-за его увеличенной мощности.

Таким образом, особенности поля σ_x формируют условия образования и развития в породных слоях непосредственной кровли некоторого подобия трехшарнирной балки, обладающей повышенной деформативностью и, с учетом реологических факторов, способствующей росту нагрузки на свод крепи в течение поддержания выемочного штрека.

Анализ эпюр приведенных напряжений σ для обеих моделей подтверждают ранее выявленные особенности для компонент σ_y и σ_x , основные из которых сводятся к двум факторам усиления вывалообразования в приконтурных породах кровли выемочного штрека.

Во-первых, угольный прослойк K_5^2 служит концентратором напряжений в области раздела основной и непосредственной кровель. Здесь максимумы приведенных напряжений на уровне $\sigma = 45...65$ МПа однозначно разрушают угольный прослойк K_5^2 по обе стороны от вертикальных границ выработки. Также разрушаются и частично разупрочняются локальные области в районе плоскостей напластования, как в основной, так и непосредственной кровле. В совокупности это увеличивает перемещения надугольной толщи в полость выработки.

Во-вторых, в породных слоях непосредственной кровли образуются локальные зоны разрушения, формирующие подобие трехшарнирной балки, которая за счет своей повышенной податливости может спровоцировать с течением времени рост перемещений массива в кровле и увеличение нагрузки на свод рамной крепи.

12.3.2. ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ПОРОД В БОКАХ ВЫЕМОЧНОГО ШТРЕКА

Главной особенностью распределения вертикальных напряжений σ_y в боках выемочного штрека является формирование зоны опорного давления, более интенсивного по восстанию пласта и менее – по падению. Также общей чертой является то, что концентрация σ_y затрагивает полностью угольный пласт, первый породный слой непосредственной почвы ($m_1^{II} = 0,35...0,6$ м) и частично приграничные участки первого породного слоя непосредственной кровли и второго слоя непосредственной почвы. Большая глубина разработки способствует не только развитию обширной зоны опорного давления по падению и восстанию пласта, но и появлению концентраций σ_y по плоскостям контакта основной и непосредственной почвы за вертикальными границами выработки на значительное расстояние. Этому способствует существенно различные (в 1,8 – 2 раза) деформационные характеристики породных слоев основной и непосредственной почвы.

Вертикальные напряжения в опорной зоне достигают $\sigma_y = 45...65$ МПа и однозначно разрушают угольный пласт K_5^1 на значительное расстояние от выработки по восстанию и падению. Принимая во внимание среднюю крепость пород непосредственной кровли и почвы, следует ожидать их частичного разупрочнения в локальных зонах, примыкающих к выработке. Указанные нарушения боковых пород увеличивают их податливость и способствуют интенсификации вертикальных сдвижений надугольной толщи.

Горизонтальные напряжения σ_x в боках выемочного штрека имеют локальные возмущения в приконтурной области (до 1 – 1,5 м) где появляются

небольшие (до 2 МПа) растягивающие σ_x , которые с удалением от выработки переходят в сжимающие, приближаясь к величине нетронутого массива. Исключение составляют два явления. *Во-первых*, концентрация сжимающих $\sigma_x = (2,3...2,7)\lambda\gamma H$ в районе опор стоек рамной крепи, что объясняется, на наш взгляд, высоким опорным давлением, изгибающим слои непосредственной почвы вблизи контура выработки. *Во-вторых*, появляются значительные растягивающие напряжения σ_x (до 10 – 15 МПа) в породном прослойке пласта K_5^1 , вызывающие его разрушение. Эта область по восстанию и падению пласта развивается на 6 – 8 м и обусловлена большой разницей (порядка 7,7 раз) деформационных характеристик угля и породного прослойка при высоком опорном давлении: жесткий породный прослойк малой мощности ($m^{np} = 0,12$ м), имея податливое основание в виде нижней пачки угольного пласта, просто сминается (скалывается) высоким опорным давлением.

Приведенные напряжения в боках выработки имеют значительную концентрацию до 45 – 70 МПа, что обуславливает разрушение угольного пласта K_5^1 и частичное разупрочнение локальных областей породных слоев непосредственной кровли и почвы. Разрушенный боковой массив по теории проф. П.М. Цимбаревича формирует боковую нагрузку на крепь, линейно связанную с высоким опорным давлением. В то же время, рамная трехзвенная крепь не приспособлена к восприятию высокой боковой нагрузки, поэтому с течением времени следует контролировать состояние стоек рамы и при необходимости их усиливать.

Таким образом, НДС пород в боках выработки указывает не только на развитие вертикальных перемещений надугольной толщи, но и на вероятность значительных боковых подвижек массива в полость выработки.

12.3.3. ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ПОРОД ПОЧВЫ ВЫЕМОЧНОГО ШТРЕКА

Эпюра вертикальных напряжений σ_y в почве выемочного штрека четко указывает на формирование обширной зоны разгрузки, затрагивающей не только непосредственную, но и основную почву. Размеры зоны разгрузки в почве превышают таковые в кровле выработки; также сказываются существенно выше максимумы растягивающих напряжений $\sigma_y = 4...6$ МПа. Это указывает на стабильность закономерностей перемещений почвы в полость выработки вне зависимости от структуры углевмещающей толщи. Тем не менее, в модели (когда в наличии более мощные породные слои непосредственной кровли m_1^K и основной почвы m_3^H) размеры зоны разгрузки в почве оказались ниже. Превышение размеров и максимумов растягивающих

напряжений σ_x в почве по сравнению с кровлей обусловлено интенсивным опорным давлением в боках выработки на больших глубинах разработки и весьма неоднородной структурой углевмещающей толщи. Этот процесс усиливают локальные очаги разупрочнения породы в районе поверхности контакта основной и непосредственной почвы, появляющиеся из-за концентраций σ_y , обусловленных существенно различными деформационными характеристиками породных слоев m_2^II и m_3^II .

Эпюры горизонтальных напряжений σ_x в почве выработки наглядно характеризуют прогибы породных слоев основной и непосредственной почвы в полость выемочного штрека. В верхних частях каждого из породных слоев почвы действуют растягивающие σ_x , достигая величины 15 – 20 МПа. Таким растягивающим усилиям исследуемые породы сопротивляться не в состоянии, поэтому возникают достаточно обширные области (примерно, равные ширине выработки) в верхних частях каждого породного слоя, где происходит их разрушение. Это интенсифицирует процесс перемещения пород почвы в полость выработки.

Эпюры приведенных напряжений σ подтверждают выявленные закономерности проявления пучения почвы: весьма обширная область разгрузки непосредственно под выработкой, провоцирующая с течением времени развитие и слияние областей разрушения в почве; локальные разрушения по плоскостям напластования основной и непосредственной кровли усиливают горизонтальные перемещения и прогиб породных слоев в полость выемочного штрека.

12.3.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЗОН НАРУШЕННЫХ ПОРОД ВОКРУГ ВЫЕМОЧНОГО ШТРЕКА

Прежде всего, уточнена методология поиска областей, где происходит частичное или полное разрушение породы. Ранее было установлено, что в кровле и почве выработки образуются зоны разгрузки с появлением пониженных растягивающих напряжений σ_y и σ_x , а в боках выработки формируется зона опорного давления, где действуют повышенные сжимающие напряжения σ_y и σ_x . Общеизвестно [67, 68, 115, 116], что углевмещающие типы горных пород имеют весьма слабое сопротивление растяжению, оцениваемое в 2 – 7 раз меньше от прочности породы на сжатие. Кроме того, следует учитывать различного рода структурное ослабление массива (слоистость, трещиноватость, наличие пор, пустот и т.п.) и реологические факторы, снижающие все прочностные характеристики, но особенно сопротивление породы растяжению. Поэтому структурно нарушенные породы непосредственной кровли и почвы практически не способны сопротивляться рас-

тягивающим нагрузкам и целесообразно, на наш взгляд, положить равным нулю их прочность на растяжение. При этом обеспечивается надлежащий запас надежности при прогнозировании размеров областей вывалообразования в кровле и разупрочненных пород в почве. Следовательно, определение координат указанных областей в кровле и почве выработки выполнено по условию отсутствия в них растягивающих напряжений σ_y и σ_x :

$$\sigma_y = 0; \quad (12.1)$$

$$\sigma_x = 0.$$

Для установления зон вывалообразования в кровле и разупрочнения в почве достаточно выполнения одного из условий системы (12.1).

В боках выработки опорная зона характеризуется концентрацией сжимающих напряжений. Поэтому здесь наиболее применима теория прочности породы Кулона-Мора с оценкой состояния массива по величине приведенных напряжений σ . Область разупрочненных пород в боках выработки определяется по условию

$$\sigma = \sigma_{сж}. \quad (12.2)$$

Согласно критериям (12.1) и (12.2) произведена оценка размеров вывалообразования в кровле и областей разупрочненных пород в боках и почве выемочного штрека.

В кровле выработки в первой модели (вариант 1) высота зоны вывалообразования составляет до 1,4 – 1,5 м с максимумом в замке свода выработки. Ширина зоны нарушенных пород, склонных к обрушению, распространяется до 3,6 – 3,8 м. Форма зоны вывалообразования куполообразная (напоминает свод естественного равновесия по проф. М.М. Протодьяконову) и расположена практически симметрично относительно вертикальной оси выработки, а границы начала зоны вывалообразования (пяты купола) расположены в районе замков рамной крепи.

Для второй модели (вариант 2) все выводы справедливы за исключением уменьшенных размеров зоны вывалообразования: высота – до 1,0 – 1,1 м; ширина – до 3,2 – 3,4 м. Очевидно, некоторое снижение размеров зоны вывалообразования связано с повышенной мощностью первого породного слоя непосредственной кровли посредине выемочного участка.

В породах почвы выработки наблюдаются аналогичные тенденции. Зона нарушенных пород имеет куполообразную форму, симметричную относительно вертикальной оси выработки; ширина зоны по основанию купола соответствует ширине (5,45 м) выработки в проходке. Глубина зоны нарушенных пород составляет до 4,3 м в первой модели и до 3,5 м во второй модели.

В боках выработки залегают крайне неоднородные породы: песчаный сланец (непосредственная почва), песчано-глинистый сланец (непосредственная кровля), угольный пласт двухпачечного строения с прослойком песчано-глинистого сланца. Все перечисленные геологические образования

имеют разную величину сопротивления сжатию от 12 МПа угольного пласта до 65 МПа песчанистого сланца. Поэтому ширина зоны нарушенных пород в боку выработки будет разной для каждого породного слоя и угольного пласта. Кроме того, ширина зоны нарушенных пород со стороны падения пласта на 10 – 20% ниже, чем со стороны восстания, где и будет в дальнейшем располагаться лава; поэтому оценка ширины зоны нарушенных пород произведена со стороны восстания пласта (левая часть моделей). Также следует отметить, что для обеих моделей колебания ширины зон нарушенных пород в каждом породном слое и угольном пласте не выходят за рамки 10%.

В первом породном слое непосредственной кровли (район замков рамной крепи) нарушенные породы распространяются до 3,4 – 3,7 м по восстанию. В угольном пласте (прямолинейная часть стойки рамы) разупрочнение практически достигает боковых границ модели (ширина зоны – до 12,0 – 12,7 м). Такие обширные зоны нарушенных пород в боках выработки (особенно угольного пласта) необходимо учитывать при дальнейшей эксплуатации штрека в период очистной выемки в части выбора эффективного способа его охраны. В первом породном слое непосредственной почвы (район опоры стойки рамы) ширина зоны нарушенных пород невелика (из-за повышенного сопротивления сжатию) и не превышает 0,6 – 0,8 м.

Выявленные обширные зоны нарушенных пород и угольного пласта в боку выработки формируют повышенную боковую нагрузку на крепь выемочного штрека, что необходимо учитывать при оценке его устойчивости. По этим же факторам малоэффективно усиление стоек рамы анкерами в пределах мощностей первого породного слоя непосредственной кровли и угольного пласта. Целесообразна дополнительная установка анкеров в пределах мощности первого породного слоя непосредственной почвы, то есть на высоте 0,4 – 0,6 м от почвы выработки.

ВЫВОДЫ

1. В приконтурных породах кровли выемочной выработки формируется зона разгрузки сводообразной формы, в которой действуют растягивающие напряжения σ_y и σ_x , превышающие прочность породы на растяжение и предопределяющие ее разрушение в определенной области, склонной к вывалообразованию. Интенсификации этого процесса с возрастанием нагрузки на свод рамной крепи способствуют два фактора:

– увеличение прогиба породных слоев основной кровли за счет разрушения угольного прослойка K_5^2 и частичного разупрочнения примыкающих к прослойку локальных областей породных слоев основной и непосредственной кровель;

– формирование горизонтальными напряжениями σ_x в непосредственной кровле распорной системы наподобие трехшарнирной балки, обладаю-

щей повышенной податливостью.

2. В примыкающем к бокам выработки в глубь породного массива формируется зона опорного давления значительной протяженности по восстанию и падению угольного пласта. Уровень действующих напряжений (обусловленный большой глубиной разработки и существенной неоднородностью слоистого массива) указывает на разрушение угольного пласта K_5^1 и возможность частичного разупрочнения (в локальных областях) породных слоев непосредственной кровли и почвы. Этот процесс увеличивает податливость массива в зоне опорного давления и способствует развитию перемещений пород надугольной толщи в полость выработки.

3. Развитие процесса пучения в почве выемочного штрека обусловлено двумя основными факторами:

– формирование обширной области разгрузки с повышенными растягивающими напряжениями σ_x до 15 – 20 МПа, что связано с повышенным опорным давлением на больших глубинах разработки и существенно неоднородной структурой углевмещающей толщи; это порождает развитие и слияние (с течением времени) областей разрушения в почве непосредственно под выработкой;

– интенсификация горизонтальных перемещений и прогиба породных слоев в полость штрека за счет возникновения локальных очагов разрушения в районе поверхности разделения основной и непосредственной почвы за пределами вертикальных границ выработки.

13. ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ПРИКОНТУРНЫХ ПОРОД ВОЗДУХОПОДАЮЩЕГО ШТРЕКА ГОРИЗОНТА 1200 м ШАХТЫ «КРАСНЫЙ ПАРТИЗАН»

13.1. ПОСТРОЕНИЕ, ОБОСНОВАНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВОЗДУХОПОДАЮЩЕГО ШТРЕКА

Воздухоподающий штрек длиной 1020 м был пройден на глубине 1200 м по пласту K_6 буровзрывным способом. Выработка проведена смешанным забоем с верхней подрывкой пород кровли пласта K_6 , представленной в основном песчано-глинистым сланцем крепостью $f = 4...6$. Площадь сечения выработки в проходке $15,9 \text{ м}^2$, в свету до осадки – $13,8 \text{ м}^2$. Крезь выработки – металлическая арочная трехзвенная податливая серии КМП-А3-13,8, изготовлена из спецпрофиля СВП-27. Шаг установки рам 0,5 м; стойки со стороны падения пласта устанавливались непосредственно на его почву, а со стороны восстания осуществлялась подрывка непосредственной почвы (сланца песчаного «кучерявчик») на глубину 0,7 – 0,8 м с учетом величины падения пласта K_6 , равной 8° . Размеры выработки в проходке: ширина – 5,67 м, высота – 3,79 м; в свету до осадки: ширина – 5,2 м, высота – 3,55 м, которые и приняты к моделированию. Межрамное ограждение – железобетонная затяжка; закрепное пространство забутовано породой.

Опыт эксплуатации воздухоподающего штрека пласта K_6 указывает на весьма существенное проявление пучения пород почвы, в связи с чем было выполнено три подрывки на глубину от 0,4 до 1,5 м. Подрывки пород почвы осуществлялись на отдельных участках выработки, так как проявление пучения по ее длине было разной интенсивности. Наибольшая величина пучения пород достигала, начиная с ПК33 – ПК35, что связано с тремя факторами:

- разделение почвы угольного пласта на породные слои относительно небольшой мощности (от 0,65 до 2,2 м) со слабыми связями между породными слоями;

- наличие в основной почве маломощного песчано-глинистого сланца средней крепости $f = 7...9$;

- наличие в основной почве слабого глинистого сланца крепостью $f = 4...5$.

Указанные факторы позволяют квалифицировать горно-геологические условия как сложные и указывают на необходимость моделирования именно этого участка выработки.

Кровля выработки. Непосредственная кровля пласта K_6 представлена глинистым сланцем мощностью $m_1^K = 0,8$, сопротивлением сжатию $\sigma_{сж1}^K = 40$ МПа и модулем деформации $E_1^K = 1 \cdot 10^4$ МПа. Основная кровля моделируется двумя породными слоями: нижний – песчано-глинистый сланец мощностью $m_2^K = 6,7$ м, сопротивлением сжатию $\sigma_{сж2}^K = 50$ МПа, модулем деформации $E_2^K = 2,7 \cdot 10^4$ МПа; верхний слой – глинистый сланец мощностью $m_3^K = 5,8$ м имеет сопротивление сжатию $\sigma_{сж3}^K = 45$ МПа и модуль деформации $E_3^K = 1,5 \cdot 10^4$ МПа.

Угольный пласт сложного строения включает: верхнюю пачку мощностью до 0,7 м, прослой углисто-глинистого сланца мощностью 0,18 – 0,25 м, нижнюю пачку мощностью 0,04 – 0,35 м, под которой расположен слой углисто-глинистого сланца мощностью 0,26 м. Угольные пачки характеризуются сопротивлением сжатию $\sigma_{сж}^y = 40$ МПа и модулем деформации $E^y = 0,35 \cdot 10^4$ МПа. Углисто-глинистый сланец характеризуется сопротивлением сжатию $\sigma_{сж}^{np} = 15$ МПа и модулем деформации $E^{np} = 0,5 \cdot 10^4$ МПа.

Почва выработки. Непосредственная почва пласта представлена глинистым сланцем «кучерявчик» мощностью $m_1^{\Pi} = 0,65$ м, сопротивлением сжатию $\sigma_{сж1}^{\Pi} = 40$ МПа и модулем деформации $E_1^{\Pi} = 1 \cdot 10^4$ МПа. Основная почва пласта моделируется пятью породными слоями (в порядке убывания по глубине от угольного пласта): песчаник мощностью $m_2^{\Pi} = 2,2$ м, сопротивлением сжатию $\sigma_{сж2}^{\Pi} = 100$ МПа и модулем деформации $E_2^{\Pi} = 5,3 \cdot 10^4$ МПа; песчаный сланец мощностью $m_3^{\Pi} = 1,2$ м, сопротивлением сжатию $\sigma_{сж3}^{\Pi} = 80$ МПа, модулем деформации $E_3^{\Pi} = 2,7 \cdot 10^4$ МПа; глинистый сланец мощностью $m_4^{\Pi} = 2,2$ м, сопротивлением сжатию $\sigma_{сж4}^{\Pi} = 45$ МПа и модулем деформации $E_4^{\Pi} = 1,5 \cdot 10^4$ МПа; песчаный сланец «кучерявчик» мощностью $m_5^{\Pi} = 0,4$ м, сопротивлением сжатию $\sigma_{сж5}^{\Pi} = 80$ МПа, модулем деформации $E_5^{\Pi} = 2,7 \cdot 10^4$ МПа; песчаник мощностью $m_6^{\Pi} = 5,1$ м, сопротивлением сжатию $\sigma_{сж6}^{\Pi} = 100$ МПа и модулем деформации $E_6^{\Pi} = 5,3 \cdot 10^4$ МПа.

Воздухоподающий штрек моделируется с точным отражением его геометрических параметров как в плане ориентировки относительно угольного пласта, так и с точки зрения формы и размеров выработки и ее крепи с межрамным ограждением.

Рамная крепь КМП-А3-13,8 моделируется в соответствии с «Паспортом проведения и крепления...». Профиль СВП-27 отражен реальной формы и размеров с механическими характеристиками [93]: расчетный предел текучести $\sigma_T = 270$ МПа и модуль упругости $E^P = 21 \cdot 10^4$ МПа, что соответствует параметрам стали Ст.5, из которой изготавливается спецпрофиль.

Межрамное ограждение моделируется железобетонными затяжками размером $500 \times 200 \times 50$ мм с механическими характеристиками [93]: $\sigma_{сж}^3 = 20$ МПа, $E^3 = 20 \cdot 10^4$ МПа. Закрепное пространство заполнено разрушенной породой и углем от проходки с усредненным модулем деформации $E^{3ab} = 50$ МПа [119].

Этап тестирования разработанной модели выполнен по результатам серии предварительных расчетов НДС системы «горный массив-крепь», необходимых для:

- обоснования размеров модели, обеспечивающих минимальную погрешность результатов вычислений;
- уточнения условий взаимодействия породных слоев и угольного пласта по плоскостям напластований для адекватного отражения геомеханических процессов в окрестности воздухоподающего штрека;
- оценки степени достоверности результатов вычислений.

Каждая из указанных позиций была детально проанализирована и получены следующие результаты.

Структура модели включает кровлю угольного пласта на высоту (по координате Y) 13,1 м и его почву на глубину 11,75 м; в боках выработки расстояние от ее контура до боковых границ модели (по координате X) составляет 15,5 м с каждой стороны. Эти размеры подверглись анализу по вертикальной Y и горизонтальной X координатам исходя из требования, чтобы компоненты напряжений (вертикальных σ_y и горизонтальных σ_x) на границах модели приближались к исходному негидростатическому состоянию с погрешностью не более 10%, что вполне допустимо для горнотехнических расчетов.

Для условий поддержания воздухоподающего штрека исходное негидростатическое состояние определяется напряжениями в соответствии с §9.1: $\sigma_y = 30$ МПа, $\sigma_x = 10 \dots 18$ МПа.

Вертикальные напряжения σ_y на верхней границе модели стабилизируются по всей ее ширине на уровне $\sigma_y = 29,7 \dots 31,3$ МПа, что имеет отклонение от теоретического (расчетного) значения $1 - 4,3\%$ и является вполне удовлетворительной погрешностью. На нижней горизонтальной границе модели

напряжения σ_y также практически полностью стабильны (по ее ширине) – диапазон колебаний $\sigma_y = 30,4...31,5$ МПа вносит погрешность на уровне 1,3 – 5%, что является вполне приемлемым результатом. По боковым поверхностям модели напряжения σ_y монотонно увеличиваются от величины 29,7 до 31,5 МПа, а с учетом высоты модели в целом этот диапазон должен составить 29,6 – 30,3 МПа. Таким образом, по боковым поверхностям модели поле напряжений σ_y удовлетворяет исходному состоянию приконтурного массива. В целом, возмущения эпюры σ_y локализируются в пределах выбранных размеров модели, что указывает на их достаточность по фактору распределения поля напряжений σ_y .

Анализ поля горизонтальных напряжений σ_x дал следующие результаты. Напряжения σ_x весьма чувствительны к изгибу породных слоев в направлении полости выработки, особенно в слоях малой мощности. В этой связи граничные слои модели в кровле и почве имеют мощность более 5 м и по причине своей повышенной жесткости менее подвержены колебаниям изгибных напряжений σ_x . На верхней границе модели возникают колебания $\sigma_x = 13,3...15,0$ МПа, а теоретически в глинистом сланце ($\mu_3^K = 0,32$) должны действовать $\sigma_x = 14,1$ МПа; отклонения в интервале 5,7 – 6,4% являются вполне допустимыми. На нижней границе модели в песчанике вариация $\sigma_x = 15,0...16,7$ МПа имеет отклонения от теоретического значения 15,5 МПа в диапазоне 3,3 – 7,7%, который не вносит существенных погрешностей в горнотехнические расчеты. На боковых границах модели интервалы изменения σ_x более широкие: левая граница $\sigma_x = 10,0...18,0$ МПа, правая граница $\sigma_x = 11,7...16,7$ МПа. Однако, здесь следует учитывать, что боковые границы модели пересекают разные породные слои и угольные пласты со своими деформационными характеристиками, которые обуславливают разную величину горизонтальных напряжений σ_x . В пределах одной литологической разности колебания σ_x по боковым границам являются вполне допустимыми.

Таким образом, выбранные размеры модели обеспечивают достаточную точность горнотехнических расчетов и приняты постоянными для последующих этапов исследования.

Вторая задача тестирования касается обоснования условий контактов по плоскостям напластований литологических разностей в пределах высоты модели. Для этого на первом этапе были смоделированы ненарушенные (целостные) контакты между соседними слоями, как это имеет место в начальном состоянии массива до проведения выработки. Для оценки состояния контактов по плоскостям напластований наиболее информативным па-

раметром является эпюра касательных напряжений τ_{xy} , которые имеют возмущения в окрестности выработки на глубину до 10 – 12 м, а на границах модели практически исчезают, что обусловлено малым углом падения пласта K_6 (8°) и, соответственно, несущественной разницей между векторами главных напряжений σ_1 и σ_2 , а также векторами напряжений σ_y и σ_x . При этом наблюдается асимметричное изменение знака касательных напряжений τ_{xy} относительно оси, наклоненной под углом 45° к вертикальной оси выработки.

Строение любой углевмещающей толщи характеризуется, помимо традиционных параметров, силами сцепления между литологическими разностями. Общеизвестно [67, 68], что связь породных слоев по плоскостям напластований отличается низкими прочностными характеристиками: сопротивление растягивающим усилиям практически отсутствует, а сопротивление сдвигу понижено иногда на порядок и более по сравнению с породой внутри слоя. Изначально (до проведения выработки) связь между породными слоями не нарушена, поэтому оценены касательные напряжения τ_{xy} по плоскостям напластования при условии целостности контакта. Максимумы τ_{xy} располагаются на линиях, наклоненных к вертикальной оси выработки под углом $\pm 25 - 30^\circ$, причем величина максимумов $(\tau_{xy})_{max}$ убывает с увеличением расстояния от выработки: в приконтурных породах $(\tau_{xy})_{max} = 20...50$ МПа; на расстоянии 6 – 8 м от выработки $(\tau_{xy})_{max} = 3...10$ МПа. В тоже время, сцепление по плоскостям напластования обычно составляет десятые доли, реже – единицы МПа. Поэтому на расстоянии 8-12 м от выработки контакты между слоями будут нарушены с высокой степенью вероятности.

В соответствии с полученными результатами вторым этапом исследований являлся расчет НДС системы «горный массив-крепь» при нарушенных контактах между слоями (их проскальзывании относительно друг друга при прогибе в полость выработки). Для всех компонент напряжений общей чертой влияния проскальзывания слоев является увеличение максимумов напряжений в 1,5 – 1,8 раза при практически неизменной (рост не более 10%) области действия их концентрации. Это явление объясняется частично свободным прогибом слоев, что усиливает проявления горного давления в окрестности выработки, и обязательно требует учета при моделировании геомеханических процессов вокруг воздухоподающего штрека пласта K_6 .

Третьей задачей тестирования является оценка степени соответствия (в качественном плане) полей распределения компонент напряжений в модели современным исследованиям в этой области, опубликованных в наиболее представительных работах.

Эпюра вертикальных напряжений σ_y , как в целом, так и в деталях не про-

тиворечит классическим представлениям механики подземных сооружений:

- в кровле выработки образуется зона разгрузки, где пониженные (по сравнению с γH) сжимающие напряжения переходят в растягивающие при движении к контуру выработки;

- форма зоны разгрузки в кровле напоминает свод естественного равновесия по М.М. Протогьяконову и согласуется с формой вывалов, наблюдаемых в кровле поддерживаемых выработок, особенно при сильно трещиноватых породах;

- в почве выработки также образуется зона разгрузки в форме «перевернутого» свода естественного равновесия, где по мере приближения к контуру выработки пониженные сжимающие σ_y переходят в растягивающие, интенсифицирующие процесс пучения; размеры зоны разгрузки в почве превышают таковые в кровле;

- в боках выработки формируются области повышенного горного давления (ПГД), где сжимающие σ_y превышают гидростатическое давление γH в два и более раза.

Эпюра горизонтальных напряжений σ_x также в качественном плане согласуется с основными положениями механики подземных сооружений:

- породные слои кровли испытывают изгиб в сторону выработки, в связи с чем в верхних частях каждого слоя действуют повышенные сжимающие σ_x , а в нижних частях – пониженные σ_x , которые вблизи контура выработки переходят в растягивающие;

- породные слои почвы также изгибаются в сторону полости выработки с появлением растягивающих σ_x в верхней части каждого слоя и повышенных сжимающих σ_x в нижних частях каждого слоя;

- наблюдается частично свободный прогиб слоев с проскальзыванием относительно друг друга, о чем свидетельствуют скачки σ_x (иногда с изменением знака) при переходе от одного слоя к другому;

- в боках на некотором удалении от выработки происходит изменение знака кривизны изгиба породных слоев, как в кровле, так и в почве, что обусловлено некоторым подобием нежесткого защемления породных слоев ближе к границам модели; данный факт также согласуется с современными представлениями о процессах сдвижения слоистого массива в полость выработки.

Эпюра приведенных напряжений σ также не противоречит существующим положениям механики подземных сооружений:

- область разгрузки в кровле выработки имеет плавную форму очертания, так как затрагивает в основном только мощный слой ($m_2^K = 6,7$ м) песчано-глинистого сланца;

- в почве, сложенной слоями небольшой мощности, зона разгрузки имеет «ступенчато-прерывистую» форму и затрагивает четыре слоя, которые ис-

пытывают частично свободный прогиб;

– аналогичная «ступенчатая» форма наблюдается в боках выработки в зоне ПГД, причем в соответствии с классическими представлениями более жесткий слой воспринимает повышенную нагрузку, а менее жесткий – пониженную, что наглядно проявляется в слоистой почве штрека.

Качественное соответствие классическим представлениям механики твердого деформируемого тела подтверждает также эпюра касательных напряжений τ_{xy} , где установлен факт распределения τ_{xy} по мощности каждого породного слоя с максимумом на их поверхностях.

Таким образом, разработанная геомеханическая модель качественно отражает процессы сдвижения углевмещающей толщи в полость воздухоподающего штрека и полностью обоснована для исследования НДС вмещающих выработку пород.

13.2. ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ПРИКОНТУРНЫХ ПОРОД КРОВЛИ И БОКОВ ВОЗДУХОПОДАЮЩЕГО ШТРЕКА

Исследование выполнено по трем компонентам напряжений: вертикальным σ_y , горизонтальным σ_x и приведенным σ . Вертикальные и горизонтальные напряжения обычно наиболее информативно отражают НДС любой геомеханической системы. В исследуемых условиях угол падения пласта всего 8° , поэтому величина и направление действия главных напряжений σ_1 и σ_3 мало чем отличаются от векторов σ_y и σ_x . Тогда эти компоненты будут вполне объективно отражать НДС породного массива, вмещающего воздухоподающий штрек. Отдельно каждая из компонент σ_y или σ_x не могут описать состояние породы и условия ее перехода в стадию разупрочнения; здесь используется общепринятая теория прочности горной породы Кулона-Мора, которая наиболее адекватно отражает состояние породы в области действия сжимающих нагрузок. Поэтому рассчитывается интегральный показатель – приведенные напряжения σ (являющиеся комбинацией всех напряжений и угла внутреннего трения породы) и сравнивается с сопротивлением породы сжатию. В области действия растягивающих напряжений наиболее приемлемым (для оценки состояния породы) является сравнение компонент σ_y и σ_x с величиной сопротивления породы растяжению. Изложенные критерии определения областей разупрочненного породного массива приняты нами в дальнейших исследованиях.

Анализ НДС вмещающего массива выполнен с эпюры вертикальных напряжений σ_y .

В кровле выработки образуется зона разгрузки, где пониженные (по отношению к исходному негидростатическому напряженному состоянию) сжимающие σ_y переходят в растягивающие при движении к контуру выработки.

Зона разгрузки в целом имеет форму свода, который меняет свою геометрию в зависимости от величины и знака вертикальных напряжений. Область действия растягивающих σ_y имеет пониженную высоту свода – до 1,1 м при его ширине до 2,9 м (отношение высоты к ширине составляет около 0,4). С переходом в область пониженных сжимающих σ_y свод вытягивается по верти-

кальной оси, достигая (при $\frac{\sigma_y}{\gamma H} = 0,5$) высоты 5,8 м, то есть распространяется

на всю мощность второго слоя кровли (песчано-глинистый сланец). Ширина свода увеличивается менее интенсивно – до 4,5 м, так, что отношение высоты к ширине составляет порядка 1,3. При этом боковые границы свода располагаются практически вертикально, что соответствует известным представлениям о формировании нагрузки на крепь от веса области неустойчивых пород, которая формируется в кровле и может расширяться от действия ослабляющих породу факторов: реологии, трещиноватости, обводненности и т.п. Если принять границу зоны неустойчивых пород по условию отсутствия растягивающих напряжений ($\sigma_y = 0$) в кровле, то вертикальное давление на крепь составляет порядка 28 кПа, а общая вертикальная нагрузка на раму – до 150 кН, которую вполне способна выдержать рамная крепь из спецпрофиля СВП-27 (несущая способность в среднем 280 – 330 кН).

В боках воздухоподающего штрека располагается область повышенного горного давления, что вполне соответствует современным представлениям о механизме сдвижения горных пород в полость выработки. В связи с большой глубиной размещения выработки ($H = 1200$ м) в ее боковых породах формируются достаточно высокие вертикальные напряжения: даже небольшой концентрации $\sigma_y = (1,3...1,4)\gamma H$ достаточно, чтобы их величина соответствовала сопротивлению сжатию близлежащих породных слоев кровли и почвы (глинистые и песчано-глинистые сланцы), угольного пласта и, тем более, его породных прослоев. Кроме того, обширная область указанной концентрации (высота до 19 м, ширина – до 10 м) достигает шестого породного слоя почвы (представленного песчаником), доводя его до предельного состояния по фактору действия σ_y . Концентрация вертикальных напряжений уровня $\sigma_y = (1,5...1,7)\gamma H$ также занимает значительную область: высота – до 6,6 м, ширина – до 5 м; некоторая асимметрия (относительно вертикальной оси выработки) размеров зон присутствует, но она не столь существенна – со стороны падения угольного пласта размеры увеличены всего на 6 – 8%. Концентрация $\sigma_y \approx 2\gamma H$, превышающая в 1,5 – 2 раза сопротивление сжатию пород в окрестности выработки, также имеет существенное рас-

пространение: высота – до 3,4 м, ширина – до 2,6 м. Таким образом, установлено, что вертикальные сжимающие напряжения σ_y в боках выработки образуют достаточно обширную зону ПГД, где происходит разупрочнение как угольного пласта, так и его непосредственной кровли и почвы; это обусловлено совместным действием двух факторов: большой глубиной разработки и слабыми породами непосредственной кровли и почвы пласта K_6 .

Разупрочнение пород в боках воздухоподающего штрека провоцирует снижение устойчивости пород в его почве: с одной стороны, частичное разрушение приконтурных пород в боках снижает их сопротивление горному давлению и вертикальная нагрузка передается на основную почву, где залегает песчаник; с другой стороны, происходит перераспределение общей вертикальной нагрузки в зоне ПГД на более отдаленные участки (так как снижается реакция разупрочненных приконтурных пород) в боках и, таким образом, нагружаются более отдаленные (по ширине) участки песчаника, увеличивая размеры зон концентрации напряжений. Выявленные особенности поля σ_y в боковых породах необходимо учитывать при разработке мероприятий по поддержанию воздухоподающего штрека.

Теперь перейдем к анализу поля распределения горизонтальных напряжений σ_x в кровле и боках воздухоподающего штрека.

Проскальзывание породных слоев относительно друг друга создает условия для их относительно независимого изгиба в районе выработки, что четко прослеживается в кровле пласта. Нижний слой основной кровли, несмотря на его значительную мощность (6,7 м), испытывает прогиб в полость выработки с образованием концентраций сжимающих горизонтальных напряжений (в верхней части слоя в районе вертикальной оси выработки), примерно, в два раза превышающих исходное негидростатическое состояние ($\sigma_x \approx 2\lambda\gamma H$). Кривизна линии изгиба песчано-глинистого сланца меняет знак и на расстоянии $x = 6...11$ м в боках выработки возникает концентрация $\sigma_x = (1,5...1,8)\lambda\gamma H$ в нижней части слоя. Такое деформирование песчано-глинистого сланца объясняется его частично нежестким защемлением в боковых областях массива. В приконтурных породах кровли непосредственно над выработкой происходит уменьшение сжимающих σ_x вплоть до нуля, однако, возникновения растягивающих σ_x не происходит, как это имеет место в классическом понимании изгиба плиты. Данный факт обусловлен тремя причинами: большой мощностью слоя; действием сжимающих σ_x в глубине массива (исходное негидростатическое напряженное состояние); отпором рамной крепи. В целом, уровень действующих сжимающих σ_x в 2 – 4 раза и более ниже сопротивления сжатию песчано-глинистого сланца основной кровли.

В породных боках воздухоподающего штрека наблюдается несколько иная картина распределения горизонтальных напряжений σ_x , которая обусловле-

на залеганием тонких и относительно однородных (по механическим свойствам) литологических разностей малой крепости. На расстоянии от контура выработки более 2,5 – 3 м наблюдается стабилизация поля σ_x по всем вышеуказанным литологическим разностям. Здесь обращает внимание то, что достаточно однородное поле σ_x имеет в 1,5 – 1,8 раз более высокие значения, чем исходное негидростатическое состояние, а это происходит на стадии разупрочнения, когда растёт коэффициент μ поперечной деформации породы (влияющий на значение σ_x) из-за появления микроразрушений. Тогда естественно предположить, что слабые породы непосредственной кровли и почвы, а также угольный пласт на значительном расстоянии (по ширине) от контура выработки находятся в предельном или близком к предельному состоянию. Приконтурные породы в боках из-за изгибных деформаций разгружаются от сжимающих напряжений σ_x вплоть до нуля. Но, здесь следует принять во внимание концентрацию вертикальных напряжений σ_y , а по теории прочности Кулона-Мора, чем больше разница между главными максимальным и минимальным напряжениями, тем выше вероятность разрушения породы. Таким образом, распространение предельного или близкого к нему состояния пород на значительную глубину в бока выработки создает условия для более интенсивного нагружения пород почвы за счет снижения сопротивления опорному давлению в боках выработки.

Заключительной частью анализа НДС пород кровли и боков воздухоподводящего штрека является исследование поля распределения приведенных напряжений σ .

В кровле выработки над ее центральной частью образуется зона разгрузки, вытянутая по вертикали, где величина σ не превышает 8 – 10 МПа. Но, здесь следует более детально подойти к анализу формирования зоны разгрузки: с одной стороны, низкий уровень приведенных напряжений в кровле говорит о ее устойчивости; с другой стороны, приведенные напряжения характеризуют абсолютные значения сочетаний компонент σ_y и σ_x вне зависимости от знака последних, а именно, в этой области действуют пониженные сжимающие σ_x и растягивающие σ_y , которые нарушают целостность приконтурных пород кровли, что было изложено ранее. В боковых областях основной кровли в ее нижней части образуются концентрации σ шириной до 4 м и высотой до 3 м. Здесь действуют исключительно сжимающие компоненты σ_y и σ_x , которые образуют концентрацию σ , соответствующую уровню сопротивления боковых пород сжатию. Поэтому по бокам выработки в основной кровле формируются локальные области предельного состояния от действия сжимающих σ_y и σ_x одновременно. Таким образом, на основе комплексной оценки всех компонент напряжений приходим к выводу, что область предельного состояния в кровле выходит за пределы ширины выработки и

составляет по горизонтали порядка 8 – 9 м.

В породных боках, представленных тонкими слоями непосредственной кровли и почвы в сочетании с угольным пластом, образуется концентрация приведенных напряжений σ , обусловленная совместным действием сжимающих вертикальных σ_y и горизонтальных σ_x компонент. Эта область достаточно выдержана по высоте выработки и достигает ширины 2,4 – 2,7 м. Величина σ , примерно, соответствует сопротивлению сжатию, представленных литологических разностей и генерирует разупрочнение боковых пород. Таким образом, выявлена особенность формирования зоны разупрочненных пород в кровле и боках выработки, напоминающая подобие оболочки из пород с пониженной реакцией сопротивления горному давлению. Ширина зоны (с учетом размеров выработки) составляет 10 – 11 м и опорное давление перемещается за ее пределы, расширяя область действия повышенных нагрузок на породные слои почвы. Этот процесс, способствует интенсификации проявлений горного давления в почве воздухоподающего штрека.

13.3. ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ПОРОД ПОЧВЫ ВОЗДУХОПОДАЮЩЕГО ШТРЕКА

В породах почвы, примерно, по ширине выработки, образуется зона разгрузки, где сжимающие вертикальные напряжения $\sigma_y = \gamma H$ снижаются и, по мере приближения к контуру штрека, переходят в растягивающие σ_y , представляющие наибольшую опасность с точки зрения сохранения целостности породы. Форма зоны разгрузки в почве аналогична таковой в кровле и напоминает «перевернутый» свод, обращенный основанием к выработке. Одной из особенностей является то, что размеры зоны разгрузки в почве существенно больше, чем в кровле (на 42 – 57%). Так, разгрузка порядка $\sigma_y = (0,1 \dots 0,2) \gamma H$ распространяется на всю мощность песчаника и песчаного сланца, достигая верхней части слоя из глинистого сланца. Достаточно значительная глубина (до 4 м) такого уровня разгрузки таит опасность в плане потери устойчивости почвы по двум причинам:

– *во-первых*, вышележащая область растягивающих σ_y разупрочняет песчаник, в результате чего практически исчезает подпор разрушенной области на нижележащую устойчивую область; трехосное НДС переходит в двухосное и активизирует процесс перемещения более глубоких пород почвы – растягивающие σ_y распространяются глубже и зона разупрочнения увеличивается;

– *во-вторых*, действуют разупрочняющие породу факторы (реологии, трещиноватости, обводненности и т.п.), которые также интенсифицируют перемещение более глубоко залегающих пород в полость выработки. Даже

в самом идеализированном случае растягивающие σ_y неминуемо разупрочняют почву на глубину до 2,7 м, то есть на всю мощность песчаника, что объясняет парадоксальную на первый взгляд ситуацию развития пучения в песчанике крепостью $f = 9...11$ по шкале проф. М.М. Протодьяконова. Основная причина такого явления заключается не в высокой крепости песчаника, а в действии растягивающих напряжений σ_y , которым песчаник, как и любая другая горная порода, сопротивляются весьма слабо, а, с учетом естественной трещиноватости, можно достаточно обоснованно утверждать, что такое сопротивление перпендикулярно главной системе трещин практически отсутствует.

Анализ поля распределения горизонтальных напряжений σ_x в почве штрека выявил ряд особенностей. Непосредственная почва, представленная глинистым сланцем, находится в разгруженном состоянии при действии как сжимающих, так и растягивающих горизонтальных напряжений на уровне $\sigma_x = (0...0,15)\lambda\gamma H$. Это вполне объяснимо, так как непосредственная почва имеет небольшую жесткость (малая мощность и низкие механические характеристики) и находится под защитой более крепкого и мощного песчаника основной почвы. Тем не менее, даже при небольших растягивающих напряжениях σ_x слабый глинистый сланец разупрочняется, но из-за небольшой мощности в геомеханических процессах пучения играет второстепенную роль. Наиболее нагруженным является первый породный слой основной почвы, представленный песчаником: в его верхней части по всей ширине выработки, примерно, на треть мощности, действуют растягивающие σ_x , способствующие разупрочнению песчаника; в нижней части песчаника (также, примерно, на треть мощности) наблюдается концентрация сжимающих $\sigma_x = (2...2,5)\lambda\gamma H$. В этой связи представляет интерес эффект от комбинации действий компонент σ_y и σ_x : средняя треть мощности песчаника разгружена от сжимающих σ_x , но здесь действуют растягивающие σ_y , нарушающие его целостность; в нижней трети мощности песчаника концентрация сжимающих σ_x сама по себе не способна разупрочнить песчаник, но она усиливает действие уже затухающих растягивающих σ_y (по теории прочности Кулона-Мора), что в результате также приводит к разупрочнению песчаника. Таким образом, по всей мощности породного слоя из песчаника происходит его разупрочнение непосредственно под выработкой. Также обращает внимание характер изгиба слоя из песчаника – под выработкой прогиб происходит в полость штрека, а за его пределами кривизна линии изгиба меняет знак и зоны разгрузки от горизонтальных напряжений σ_x появляются уже в нижней части мощности песчаника; причем по восстанию угольного пласта возникают в ограниченной области растягивающие σ_x . Эта зона разгрузки

достаточно обширна и за пределами выработки распространяется до 5 – 6,5 м с каждой стороны, а ее влияние на целостность песчаника заключается в том, что чем меньше сжимающие σ_x , тем больший разупрочняющий эффект способны создать повышенные сжимающие σ_y в зоне опорного давления, куда как раз попадает исследуемая область. В меньшей степени, но аналогичные геомеханические процессы протекают и в нижележащем песчаном сланце, где отчетливо прослеживается его прогиб в направлении штрека.

Минимальные значения приведенных напряжений (до 5 МПа) располагаются в непосредственной почве под выработкой, а ее второстепенное влияние на процесс пучения было отмечено ранее. Второй слой почвы – песчаник – имеет по ширине выработки достаточно значительные колебания $\sigma = 5...30$ МПа. В центральной (по мощности и ширине выработки) части слоя располагается ядро разгрузки (примерно $0,9 \times 1,2$ м), где величина σ составляет 5 – 8 МПа. Природа формирования этого ядра очевидна – горизонтальные напряжения σ_x в центральной части изгибающегося слоя всегда имеют минимум, а вертикальные напряжения σ_y также невелики. Таким образом, сочетание небольших значений σ_x и σ_y (по теории прочности Кулона-Мора) не дает в результате сколь-нибудь значительной величины приведенных напряжений. Ближе к границам зоны разгрузки σ увеличивается до 25 – 35 МПа, но эти значения остаются в несколько раз меньше сопротивления песчаника сжатию и по фактору действия σ разупрочнения песчаника под выработкой в пределах ее ширины не должно происходить вопреки визуальным наблюдениям. Объясняется это противоречие исключительно действием растягивающих напряжений (в большей степени вертикальных σ_y , в меньшей – горизонтальных σ_x), что было доказано ранее при анализе эпюр σ_y и σ_x – по всей мощности песчаника (по ширине выработки) происходит его разупрочнение, что интенсифицирует пучение почвы штрека. Тогда представляет интерес следующий вопрос – а расширяется ли зона разупрочнения песчаника за пределы выработки или локализуется только по ее ширине? Анализ распределения приведенных напряжений σ в песчанике за пределами выработки дал такие результаты. В песчанике образуются две области шириной до 1 – 1,2 м и глубиной до 1,1 – 1,4 м, которые располагаются ниже опор стоек крепи и выходят за габариты выработки. В этих областях действуют повышенные сжимающие σ_y и пониженной величины сжимающие σ_x ; в совокупности компоненты σ_y и σ_x генерируют значения приведенных напряжений σ , приближающихся к величине сопротивления песчаника сжатию, но не превышающих ее. Однако, устойчивое состояние песчаника в областях концентрации σ может быть нарушено под воздействием известных разупрочняющих породу факторов: реологии, трещиноватости и обводненности. Тогда локальные нарушения в песчанике могут распростра-

няться за пределы выработки в рамках, установленных размеров зон концентрации σ , что в целом усилит проявления пучения почвы штрека.

Таким образом, в основной почве, верхний слой которой представлен крепким песчаником достаточной мощности (2,2 м), происходит активный процесс разупрочнения, что проявляется в интенсивном печении почвы, который провоцируется высоким опорным давлением в боках выработки, обусловленным ее размещением на глубине 1200 м. В связи с установленными геомеханическими процессами для обеспечения требуемого эксплуатационного состояния штрека необходима разработка технических мероприятий по повышению устойчивости его почвы.

ВЫВОДЫ

1. На основе анализа опыта поддержания воздухоподающего штрека пласта K_6 и структуры вмещающего массива по длине выработки выбран и обоснован наиболее сложный участок, с точки зрения минимальной устойчивости почвы, представленной маломощными слоями различных литотипов пород. Составлена модель этого участка выработки; обоснованы все основные параметры модели геомеханической системы «горный массив-крепь», которые наиболее адекватно отражают условия поддержания воздухоподающего штрека пласта K_6 .

2. Проведенное тестирование геомеханической модели по всем компонентам напряжений установило качественное соответствие результатов расчета современным представлениям о состоянии слоистого углевмещающего массива в окрестности воздухоподающего штрека, а также непротиворечие основным положениям механики подземных сооружений и механики твердого деформируемого тела в целом. Векторное представление эпюр полных перемещений в окрестности воздухоподающего штрека полностью соответствует современным представлениям о механизме развития пучения почвы выработки, а сама модель достаточно адекватно отражает горно-геологическую ситуацию поддержания штрека.

3. Исследования НДС пород кровли и боков воздухоподающего штрека выявили следующие особенности. В породах кровли образуется разгруженная зона, где наибольшую опасность представляют растягивающие вертикальные напряжения σ_y , которые формируют свод естественного равновесия высотой до 1,1 м. Однако, вертикальная нагрузка от веса пород внутри свода естественного равновесия, примерно, в два раза ниже несущей способности рамной крепи из спецпрофиля СВП-27, что предопределяет ее устойчивое состояние. В боках выработки образуется обширная зона повышенного горного давления, разупрочняющего породы непосредственной кровли и почвы, а также угольный пласт на ширину до 2,4 – 2,7 м. Таким образом, ширина зоны разупрочнения пород вокруг выработки развивается до

10 – 11 м, что обуславливает перемещение опорного давления в глубь массива на ширину разупрочненных пород. Перераспределение усилий в зоне опорного давления расширяет область приложения повышенных нагрузок (со стороны пород кровли и боков выработки) на основную почву, что способствует интенсификации проявлений горного давления в почве воздухоподающего штрека.

4. Несмотря на высокое сопротивление песчаника сжатию, представляющего первый породный слой основной почвы, происходит его разупрочнение, распространяющееся на всю мощность (в районе вертикальной оси выработки), а по бокам – до половины мощности песчаника. В пределах ширины выработки процесс разупрочнения песчаника происходит преимущественно от действия растягивающих вертикальных напряжений σ_y , которое усиливается в верхней трети слоя распространением растягивающих горизонтальных напряжений σ_x . Под опорами стоек рамной крепи образуются локальные области, выходящие за пределы ширины выработки, где возможно разупрочнение песчаника от совместного действия сжимающих σ_y и σ_x . Образуется сводчатая форма (с малой стрелой подъема) достаточно обширной области разупрочненного песчаника, которая является основной причиной интенсивного проявления пучения пород почвы выработки.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Мероприятия по снижению и предотвращению пучения пород почвы в горных выработках: Угольный портал: [Электронный ресурс]. – режим доступа: http://www.coal.dp.ua/index.php?option=com_content&view=article/-02.04.2013.
2. Кужель, С.В. Обоснование способа повышения устойчивости камер большого поперечного сечения угольных шахт [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.04 / С.В. Кужель; [ГГА Украины]. – Днепропетровск, 2000. – 199 с.
3. Фесенко, Е.В. Прогноз та закономірності здимання шаруватих порід підшви гірничих виробок [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.04 / Е.В. Фесенко [Національний гірничий ун-т]. – Дніпропетровськ, 2005. – 16 с.
4. Татаринев, А.А. Прогнозування та підвищення стійкості виробок в умовах слабометаморфізованих порід Західного Донбасу [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.04 / А.А. Татаринев [Національний гірничий ун-т]. – Дніпропетровськ, 1999. – 15 с.
5. Коробкин, С.Г. Разработка технологических параметров способа предотвращения пучения почвы капитальных выработок разгрузкой и упрочнением пород [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.04 / С.Г. Коробкин; [Московский горный ин-т]. – М., 1989. – 16 с.
6. Шмиголь, А.В. Особенности пучения почвы в выработках шахт Западного Донбасса [Текст]: / А.В. Шмиголь, В.Я. Кириченко, В.П. Лишим // Уголь Украины. – 1985. – № 12. – С. 12 – 14.
7. Гапеев, С.Н. Исследование процесса пучения почвы протяженной горной выработки лабораторными и численными методами [Текст]: / С.Н. Гапеев // Сб. научн. тр. НГУ. – 2003. – Т.1. – № 17. – С. 350 – 355.
8. Пихконен, Л.В. Обоснование параметров взрывоцелевой разгрузки почвы повторно используемых подготовительных выработок глубоких шахт [Текст]: / автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.04 / Л.В. Пихконен; [Санкт-Петербургский горный ин-т]. – СПб., 1992. – 19 с.
9. Рязанцев, О.П. Обґрунтування параметрів способу забезпечення стійкості капітальних виробок вугільних шахт в умовах нестійких порід підшви [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.04 / О.П. Рязанцев; [Національний гірничий ун-т]. – Дніпропетровськ, 2004. – 16 с.
10. Литвинский, Г.Г. Прогноз пучения пород почвы горных выработок – вероятностный аспект [Текст]: / Г.Г. Литвинский, Э.В. Фесенко // Сб. научн. тр. Донбасского госуд. техн. ун-та. – 2010. – № 31. – С. 168 – 177.
11. Литвинский, Г.Г. Прогноз пучения пород почвы горных выработок – вероятностный аспект [Текст]: / Г.Г. Литвинский, Э.В. Фесенко // Сб. научн. тр. ДонНТУ. – 2004. – № 72. – С. 19 – 23.
12. Негрейх, С.Г. О возможности предотвращения повторного пучения пород почвы горных выработок после их подрывки [Текст] / С.Г. Негрейх // Вісті ДонНТУ. – 2005. – № 2. – С. 65 – 68.
13. Касьян, Н.Н. Определение рациональной области применения способа механического отпора породам почвы выемочной выработки [Текст]

/ Н.Н. Касьян, С.Г. Негрей, И.Г. Сахно // Науковий вісник НГУ. – 2007. – № 5. – С. 45 – 48.

14. Петренко, Ю.А. Оценка продолжительности эффекта локальной разгрузки пород почвы выработок для обеспечения их длительной устойчивости [Текст] / Ю.А. Петренко, А.О. Новиков, А.В. Захаренко, С.В. Захаренко // Материалы междун. науч.-практ. конф. «Перспективы развития горных технологий в начале третьего тысячелетия». – Алчевск: ДГМИ, 1999. – С. 83 – 87.

15. Развитие научных основ повышения устойчивости горных выработок шахт Западного Донбасса [Текст]: монография / В.И. Бондаренко, А.В. Мартовицкий, И.А. Ковалевская, В.Г. Черватюк. – Днепропетровск: ЛізуновПрес, 2010. – 340 с.

16. Методы расчета перемещений и упрочнения приконтурных пород горных выработок шахт Западного Донбасса [Текст]: монография / В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, А.В. Мартовицкий, А.Ф. Копылов. – Днепропетровск: Підприємство «Дріант», 2010. – 328 с.

17. Евдокимов-Ростовский, М.И. Давление горных пород и расчет тоннельных обделок [Текст] / М.И. Евдокимов-Ростовский. – Томск: Городская типография, 1927. – 173 с.

18. Белов, В.И. Исследования явления пучения в горных выработках [Текст] / В.И. Белов // Горный журнал. – 1929. – № 1. – С. 45 – 49.

19. Гурдус, А.В. Изучение причин вспучивания горных пород камерно-угольной формации Донбасса и меры борьбы с этим явлением [Текст] / А.В. Гурдус. – Харьков: Гос. науч.-техн. изд-во, 1933. – 79 с.

20. Белов, В.И. Крепление подземных выработок в сильно пучащих породах [Текст] / В.И. Белов // Горный журнал. – 1933. – №1. – С. 15 – 20.

21. Ростовцев, Д.С. Управление кровлей при разработке пологопадающих пластов каменного угля [Текст] / Д.С. Ростовцев. – Харьков – Киев: Гос. науч.-техн. изд-во Украины, 1935. – 378 с.

22. Соколовский, В.В. Статика сыпучей среды [Текст] / В.В. Соколовский. – М.: Гостехиздат, 1954. – 276 с.

23. Цимбаревич, П.М. Рудничное крепление [Текст] / П.М. Цимбаревич. – М.: Углетехиздат, 1951. – 284 с.

24. Слесарев, В.Д. Механика горных пород [Текст] / В.Д. Слесарев. – М.: Углетехиздат, 1948. – 303 с.

25. Городничев, В.М. Пучение горных пород и меры борьбы с этим явлением [Текст] / В.М. Городничев. – М.: ЦИТИ, 1954. – 130 с.

26. Городничев, В.М. Современные методы борьбы с пучением горных пород [Текст] / В.М. Городничев. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 100 с.

27. Барановский, В.М. Влияние горного давления на эффективность применяемых способов разработки пологих пластов Донбасса [Текст] / В.М. Барановский // Уголь. – 1958. – № 4. – С. 3 – 8.

28. Сыроватко, М.В. Гидрогеология и инженерная геология при освоении угольных месторождений [Текст] / М.В. Сыроватко. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 499 с.

29. Глушко, В.Т. Различие в свойствах пучащихся и непучащихся пород Донбасса [Текст] / В.Т. Глушко // Уголь Украины. – 1961. – № 11. – С. 27 – 28.
30. Шейхет, М.Н. Давление пучащихся пород на креп подземных выработок [Текст] / М.Н. Шейхет. – М.: Углетехиздат, 1955. – 125 с.
31. Целигоров, А.И. Некоторые вопросы изучения горных пород [Текст] / А.И. Целигоров. – М.: Углетехиздат, 1949. – 44 с.
32. Белозович, И.М. Крепление горных выработок в поддувающих породах [Текст]: монография / И.М. Белозович, А.П. Бондаренко. – М.: Углетехиздат, 1951. – 112 с.
33. Давыдов, С.С. Расчет и проектирование подземных конструкций [Текст] / С.С. Давыдов. – М.: Стройиздат, 1950. – 376 с.
34. Заславский, Ю.З. Расчет смещений почвы выработки, расположенной в слоистом горном массиве [Текст] / Ю.З. Заславский, В.П. Киндур // Проектирование и строительство угольных предприятий. 1970. – № 2. – С. 51 – 53.
35. Пирский, А.А. Опытные-промышленные испытания способа упрочнения пород для борьбы с пучением почвы [Текст] / А.А. Пирский, С.Н. Стовпник // Уголь Украины. – 1990. – № 4. – С. 9 – 11.
36. Роенок, А.Н. Устойчивость подготовительных выработок угольных шахт в условиях больших глубин разработки [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.04 / А.Н. Роенок; [ГГА Украины]. – Днепропетровск, 1995. – 426 с.
37. Черняк, И.Л. Предотвращение пучения почвы горных выработок [Текст] / И.Л. Черняк – М.: Недра, 1978. – 237 с.
38. Максимов, А.П. Выдавливание горных пород и устойчивость подземных выработок [Текст] / А.П. Максимов. – М.: Госгортехиздат, 1963. – 144 с.
39. Глушко, В.Т. Охрана выработок глубоких шахт [Текст]: монография / В.Т. Глушко, Т.Н. Цай, Л.И. Вагонов. – М.: Недра, 1975. – 200 с.
40. Мельников, Е.А. Механизм и закономерности пучения горных пород в выработках [Текст] / Е.А. Мельников, С.Н. Выборнова // В кн. Горнотехнические проблемы. – М.: Недра, 1988. – С. 58 – 64.
41. Шлиголь, А.В. Обоснование способа и средств крепления выемочных штреков в условиях шахт Западного Донбасса [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.02 / А.В. Шлиголь; [ДГИ им. Артема]. – Днепропетровск, 1989. – 210 с.
42. Кириченко, В.Я. О механике пучения почвы выработок, сооружаемых в слабых породах [Текст] / В.Я. Кириченко, А.В. Шлиголь, В.Н. Рева // Шахтное строительство. – 1988. – № 11. – С. 3 – 5.
43. Пирский, А.А. Шахтные исследования пучения почвы в выработках Западного Донбасса [Текст] / А.А. Пирский, С.Н. Стовпник // Уголь Украины. – 1989. – № 11. – С. 2 – 3.
44. Сквиорцов, Г.Г. Инженерно-геологическая характеристика пучения пород на угольных месторождениях СССР [Текст] / Г.Г. Сквиорцов, А.К. Кориковская // Советская геология. – 1961. – № 11. – С. 158 – 164.
45. Сквиорцов, Г.Г. Инженерно-геологическое изучение глубоких горизонтов месторождений полезных ископаемых при разведке [Текст]: монография / Г.Г. Сквиорцов, В.В. Фром. – М.: Недра, 1970. – 160 с.

46. Шашенко, А.Н. Устойчивость подземных выработок в неоднородном породном массиве [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.04 / А.Н. Шашенко; [ДГИ им. Артема]. – Днепропетровск, 1988. – 507 с.

47. Татаринов, А.А. Прогнозирование и повышение устойчивости выработок в условиях слабометаморфизованных пород Западного Донбасса [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.04 / А.А. Татаринов; [ГГА Украины]. – Днепропетровск, 1999. – 143 с.

48. Тулуб, С.Б. Прогнозирование и повышение устойчивости выработок в условиях пучения пород почвы [Текст]: дис. ...канд. техн. наук: 05.15.04 / С.Б.Тулуб; [ГГА Украины]. – Днепропетровск, 1996. – 156 с.

49. Солодянкин, О.В. Оцінка стійкості порід підшви гірничих виробок [Текст] / О.В. Солодянкин // Вісник ЖДТУ. – 2006. – № 3 (38). – С. 189 – 196.

50. Гапеев, С.Н. Закономерности потери упругопластической устойчивости сложноструктурного массива в окрестности одиночной выработки [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.09 / С.Н. Гапеев; [Национальный горный ун-т]. – Днепропетровск, 2005. – 188 с.

51. Савченко, Е.С. Обоснование эффективных способов борьбы с пучением пород почвы в подготовительных выработках угольных шахт [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.22 / Е.С. Савченко; [ЮРГТУ (НПИ)]. – Новочеркасск, 2010. – 16 с.

52. Соловьев, Г.И. Об особенностях пучения почвы выемочных выработок в условиях шахты «Южно-Донбасская № 3» [Текст] / Г.И. Соловьев, С.Г. Негрей // Известия Донецкого горного института. – 1999. – № 3. – С. 38 – 42.

53. Негрей, С.Г. О возможности предотвращения последующего пучения пород почвы горных выработок после проведения их подрывки [Текст] / С.Г. Негрей // Известия Донецкого горного института. – 2005. - №2. – С. 65 – 68.

54. Вольштейн, Г.И. О некоторых особенностях изучения пород в кваршлагах [Текст] / Г.И. Вольштейн, А.И. Смирнов, К. Баймульдин // Известия Вузов. Горный журнал. – 1985. – № 1. – С. 24 – 27.

55. Епшиев, Г.П. О деформировании горного массива вокруг очистной выработки [Текст] / Г.П. Епшиев // Уголь Украины. – 1982. – № 8. – С. 10 – 11.

56. Сопротивление материалов [Текст]: учеб. / под общ. ред. Г.С. Писаренко. – К.: Вища школа, 1979. – 696 с.

57. Дарков, А.В. Строительная механика [Текст]: учеб. / А.В. Дарков, Н.Н. Шапошников. – М.: Лань, 2010. – 656 с.

58. Савостьянов, А.В. Управление состоянием массива горных пород [Текст]: учеб. пособие / А.В. Савостьянов, В.Г. Клочков. – К.: УМК ВО, 1992. – 276 с.

59. Савостьянов, А.В. Метод расчета напряженно-деформированного состояния пород вокруг очистной выработки пологого пласта [Текст] / А.В. Савостьянов // Известия ВУЗов. Горный журнал. – 1974. – № 5. – С. 33 – 36.

60. Бондаренко, В.И. теория управления состоянием массива горных пород [Текст]: учеб. / В.И. Бондаренко, М.А. Ильяшов, Н.К. Руденко. – Днепропетровск: ЛізуновПрес, 2012. – 320 с.

61. Бондаренко, В.И. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния мелкослоистого породного массива вокруг пластовой выработки. Книга 2. Предельное и запредельное состояние системы «порода – крепь» [Текст]: монография / В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, В.В. Фомичев. – Днепропетровск: Системные технологии, 2007. – 198 с.
62. Шашенко, А.Н. Управление устойчивостью протяженных выработок глубоких шахт [Текст]: монография / А.Н. Шашенко, А.В. Солодянкин, А.В. Мартовицкий. – Днепропетровск: ЛізуновПрес, 2012. – 384 с.
63. Бондаренко, В.И. Экспериментальные исследования устойчивости повторно используемых выемочных выработок на пологих пластах Донбасса [Текст]: монография / В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, А.И. Коваль, В.В. Фомичев. – Днепропетровск: ЛізуновПрес, 2012. – 426 с.
64. КД 12.01.01.201-98. Расположение, охрана и поддержание горных выработок при отработке угольных пластов на шахтах. Методические указания. [Текст]. – К.: УкрНИМИ, 1998. – 149 с.
65. Руководство по поддержанию горных выработок на шахтах Западного Донбасса [Текст]. – СПб: ВНИМИ, 1992. – 51 с.
66. СОУ 10.1.00185790.011:2007. Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів і засобів охорони [Текст]. – К.: Мінвуглепром України, 2007. – 113 с.
67. Булычев, Н.С. Механика подземных сооружений [Текст]: монография / Н.С. Булычев. – М.: Недра, 1982. – 272 с.
68. Баклашов, И.В. Механические процессы в породных массивах [Текст]: монография / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия. – М.: Недра, 1986. – 415 с.
69. Виноградов, В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок [Текст]: монография / В.В. Виноградов. – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с.
70. Усаченко, Б.М. Свойства пород и устойчивость горных выработок [Текст]: монография / Б.М. Усаченко. – К.: Наукова думка, 1979. – 136 с.
71. Шашенко, А.Н. Обоснование способа повышения устойчивости протяженных выработок в пучащих породах [Текст] / А.Н. Шашенко, А.В. Солодянкин // Науковий вісник НГУ. – 2007. – № 5. – С. 68 – 71.
72. Солодянкин, О.В. Обґрунтування способу підвищення стійкості протяжних виробок у породах, що здимаються [Текст] / О.В. Солодянкин // Вісник ЖДТУ. – 2007. – № 2 (41). – С. 173 – 178.
73. Фисенко, Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок [Текст]: монография / Г.Л. Фисенко. – М.: Недра, 1976. – 272 с.
74. Саженин, В.С. Упруго-пластическое распределение напряжений горных выработок различного очертания [Текст]: монография / В.С. Саженин. – М.: Наука, 1968. – 94 с.
75. Колоколов, О.В. О вертикальной конвергенции пород в выработках в условиях слабой почвы [Текст] / О.В. Колоколов, Д.В. Шмиголь, Ю.М. Халимендик // Уголь Украины. – 1986. – № 11. – С. 7 – 9.

76. Сахно, И.Г. Математическое моделирование деформационных процессов в разрушенных горных породах с помощью метода конечных элементов [Текст] / И.Г. Сахно, С.Г. Негрей, А.А. Лызенко // Сб. науч. тр. ДонНТУ. – 2008. – Вып. № 14. – С. 121 – 124.
77. Шашенко, А.Н. Комплексное исследование способа обеспечения устойчивости протяженной выработки с пучащей почвой, расположенной в зоне влияния лавы [Текст] / А.Н. Шашенко, С.Н. Гапеев, А.В. Мартовицкий // Науковий вісник НГУ. – 2005. – № 7. – С. 52 – 55.
78. Гапеев, С.Н. Компьютерное моделирование процесса пучения почвы в подготовительных выработках [Текст] / С.Н. Гапеев, С.П. Лозовский, А.П. Рязанцев // Сб. научн. тр. междунар. конф. «Неделя горняка». – М.: МГГУ. – 2003. – Т. 1. – С. 99 – 101.
79. Шашенко, А.Н. Учет эффекта разупрочнения породного массива в задачах геомеханики [Текст] / А.Н. Шашенко, В.И. Янко, А.В. Солодянкин // Науковий вісник НГУ. – 2003. – № 7. – С. 29 – 33.
80. Гапеев, С.Н. Математическая модель процесса потери упруго-пластической устойчивости породного массива в окрестности одиночной выработки [Текст] / С.Н. Гапеев, А.Н. Шашенко // Материалы Украинско-Польского форума горняков. – Днепропетровск: НГУ, 2004. – С. 75 – 80.
81. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи. Методические указания [Текст]. – М.: Стройиздат, 1983. – 273 с.
82. Глушко, В.Т. Механика горных пород и охрана выработок [Текст] / В.Т. Глушко, А.З. Широков. – К.: Наукова думка, 1967. – 153 с.
83. Усаченко, Б.М. Охрана подготовительных выработок глубоких горизонтов шахт Западного Донбасса [Текст] / Б.М. Усаченко, В.Я. Кириченко, А.В. Шмиголь. – М.: ЦНИЭИУголь, 1992. – 168 с.
84. Бондаренко, В.И. Прогноз перемещений контура пластовой выработки в слоистом массиве слабых пород [Текст]: монография / В.И. Бондаренко, М.А. Ильяшов, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, В.В. Фомичев. – Днепропетровск: Системные технологии, 2008. – 193 с.
85. Прогнозный каталог шахтопластов Донецкого угольного бассейна с характеристикой горно-геологических факторов и явлений [Текст]. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1982. – 267 с.
86. Кадастр угольных шахтопластов, предусмотренных к отработке шахтами и разрезами Госуглепрома Украины [Текст]. – Донецк: Изд-во Минуглепрома Украины, 2001. – 125 с.
87. Яворский, В.Н. Обоснование параметров технологии отработки угольных целиков камерами в условиях шахт Западного Донбасса [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / В.Н. Яворский. – Днепропетровск: НГУ, 2000. – 140 с.
88. Васильев, В.Е. Анализ условий разработки пластов Западного Донбасса [Текст] / В.Е. Васильев // Науковий вісник НГУ. – 2004. – № 9. – С. 6 – 11.
89. Зборщик, М.П. Охрана выработок глубоких шахт в зонах разгрузки [Текст] / М.П. Зборщик, В.В. Назимко. – К.: Техника, 1991. – 248 с.

90. Зборщик, М.П. Закономерности горизонтальных сдвижений толщи пород при отработке пологих пластов [Текст] / М.П. Зборщик, В.В. Назимко // Уголь Украины. – 1986. – № 5. – С. 18 – 22.

91. Усаченко Б.М. Геомеханика охраны выработок в слабометаморфизованных породах [Текст] / Б.М. Усаченко, В.П. Чередниченко, И.Е. Головчанский. – К.: Наукова думка, 1990. – 144 с.

92. Ставрогин, А.Н. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах [Текст] / А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня. – М.: Недра, 1985. – 271 с.

93. Розовский, М.И. Изучение напряженного состояния вокруг горизонтальных выработок с учетом последствий в горных породах [Текст] / М.И. Розовский // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. – 1958. – № 12. – С. 66 – 72.

94. Работнов, Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций [Текст] / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1966. – 752 с.

95. Львовский, Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул [Текст] / Е.Н. Львовский. – М.: Высшая школа, 1988. – 233 с.

96. Афифи, А. Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ [Текст] / А. Афифи, С. Айзен. – М.: Мир, 1982. – 488 с.

97. Бондаренко, В.И. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния мелкослоистого породного массива вокруг пластовой выработки. Книга 1. Допредельное деформирование системы «порода-крепь» [Текст]: монография / В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, В.В. Фомичев. – Днепропетровск: Системные технологии, 2006. – 172 с.

98. Егоров, С.И. Обобщение опыта крепления и охраны подготовительных выработок [Текст] / С.И. Егоров, Ю.М. Халимендик, Э.П. Курченко, В.М. Андриенко, И.И. Сторчак, Л.Г. Иваненко // Уголь Украины. – 2002. – № 5. – С. 19 – 21.

99. Гелескул, М.Н. Справочник по креплению капитальных и подготовительных горных выработок [Текст] / М.Н. Гелескул, В.Н. Каретников. – М.: Недра, 1982. – 479 с.

100. Симанович, Г.А. Управление режимами взаимодействия породного массива с крепью горных выработок на основе регулирования ее деформационно-силовой характеристикой [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / Г.А. Симанович. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 1993. – 408 с.

101. Симанович, А.М. Совершенствование способов охраны подготовительных выработок [Текст] / А.М. Симанович, М.А. Сребный, В.И. Малов, И.Л. Белинский. – Донецк: Донбасс, 1973. – 121 с.

102. Сажин, В.С. Упруго-пластическое распределение напряжений вокруг горных выработок различного очертания [Текст] / В.С. Сажин. – М.: Наука, 1968. – 94 с.

103. Глушко, В.Т. Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления [Текст] / В.Т. Глушко, В.В. Виноградов. – М.: Недра, 1982. – 192 с.

104. Ковалевская, И.А. Исследование НДС почвы и крепи горной выработки на сверхглубоких горизонтах [Текст] / И.А. Ковалевская, Р.Н. Свистун, В.Г. Снигур // Щорічний науково-технічний збірник «Розробка родовищ» / VII Між-нар. наук.-практ. конф. «Школа підземної розробки». – Дніпропетровськ: ЛізуновПрес, 2013. – С. 35 – 39.

105. Бондаренко, В.И. Технологический регламент крепления и охраны выемочных выработок на пологих пластах [Текст] / В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, В.Г. Черватюк, В.Г. Снигур, А.В. Малыхин. – Днепропетровск: ЛізуновПрес, 2013. – 106 с.

106. Ферстер, Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа [Текст] / Э. Ферстер, Б. Ренц. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 302 с.

107. Черняк, И.Л. Управление состоянием массива горных пород [Текст] / И.Л. Черняк, С.А. Ярунин. – М.: Недра, 1995. – 395 с.

108. Бондаренко, В.И. Аналитико-экспериментальные исследования повышения устойчивости выемочных выработок и расчет параметров крепежной системы [Текст]: монография / В.И. Бондаренко В.И., И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, Р.Н.Свистун, В.Г. Снигур. – Днепропетровск: ЛізуновПрес, 2013. – 178 с.

109. Тулуб, С.Б. Підвищення стійкості підготовчих виробок з підшвою, що здимається, в умовах шахт Західного Донбасу [Текст] / С.Б. Тулуб // Науковий вісник НГУ. – 2003. – № 1. – С. 49-50.

110. Шестаков, Г.П. Влияние структурно-геологических особенностей на определение напряжений и устойчивости почвы горных выработок шахт Донбасса [Текст] / Г.П. Шестаков // Сб. науч. тр.: Приложение результатов исследований полей напряжений к решению задач горного дела и инженерной геологии. – Апатиты: Гор. типография. – 1985. – С. 100 – 104.

111. Snigur, V. Specifics of percarbonic rock mass displacement in longwalls end areas and extraction workings / I. Kovalevs'ka, O. Vivcharenko, V. Snigur // Materials of VII International scientific-practical conference "School Underground Mining" / "Mining of Mineral Deposits". – Netherlands: CRC Press/Balkema, 2013. – P. 29 – 33.

112. Черняк, И.Л. Управление горным давлением в подготовительных выработках глубоких шахт [Текст] / И.Л. Черняк, Ю.И. Бурчаков. – М.: Недра, 1984. – 304 с.

113. Якоби, О. Практика управления горным давлением [Текст] / О. Якоби. – М.: Недра, 1987. – 556 с.

114. Борисов, А.А. Механика горных пород и массивов [Текст] / А.А. Борисов. – М.: Недра, 1980. – 360 с.

115. Баклашов, И.В. Механика подземных сооружений и конструкции крепей [Текст] / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия. – М.: Недра, 1984. – 415 с.

116. Руппенейт, К.В. Некоторые вопросы механики горных пород [Текст] / К.В. Руппенейт. – М.: Углетехиздат, 1954. – 384 с.

117. Бондаренко, В.И. Геомеханика взаимодействия элементов системы «породный массив – выемочная выработка – охранная конструкция» [Текст]

/ В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, А.И Коваль. – Днепропетровск: Системные технологии, 2007. – 209 с.

118. Мельников, Н.И. Анкерная крепь [Текст] / Н.И. Мельников. – М.: Недра, 1980. – 252 с.

119. Симанович, А.М. Охрана выработок на глубоких горизонтах [Текст] / А.М. Симанович, М.А. Сребный. – М.: Недра, 1976. – 144 с.

120. Назимко, В.В. Коэффициент бокового распора обрушенных и уплотненных пород [Текст] / В.В. Назимко // Известия Вузов. Горный журнал. – 1981. – №10. – С. 25 – 27.

121. Цимбаревич, П.М. Механика горных пород [Текст] / П.М. Цимбаревич. – М.: Углетехиздат, 1948. – 183 с.

122. Байсаров, Л.В. Геомеханика и технология поддержания повторно используемых горных выработок [Текст] / Л.В. Байсаров, М.А. Ильяшов, А.И. Демченко. – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2005. – 240 с.

123. Кириченко, В.Я. Металлорамные штрековые крепи нового технического уровня [Текст] / В.Я. Кириченко // Материалы IV междунар. науч.-практ. конф. «Школа подземной разработки». – Днепропетровск: ЛізуновПрес, 2010. – С. 241 – 266.

124. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород [Текст]. – М.: Недра, 1975. – 279 с.

125. Унифицированные типовые сечения горных выработок. Т.1. [Текст]. – К.: Будивельник, 1971. – 416 с.

126. Зборщик, М.П. Определение коэффициента бокового распора обрушенных пород [Текст] / М.П. Зборщик, В.В. Назимко // В респ. межвед. науч.-техн. сб.: Разработка месторождений полезных ископаемых – .1980. – Вып. 55. – С. 70 – 72.

127. Насонов, И.Д. Моделирование горных процессов [Текст] / И.Д. Насонов. – М.: Недра, 1978. – 256 с.

128. Глушко, В.Т. Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления [Текст] / В.Т. Глушко, В.В. Виноградов. – М.: Недра, 1982. – 192 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Раздел I. ИССЛЕДОВАНИЯ ПУЧЕНИЯ ПОЧВЫ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА СРЕДНИХ ГЛУБИНАХ (100 м < H < 500 м) ОТРАБОТКИ ПОЛОГИХ ПЛАСТОВ ЗАПАДНОГО ДОНБАССА	4
1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗА ПУЧЕНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК	4
1.1 Техничко-экономические аспекты поддержания горных выработок в пучащих породах	4
1.2 Анализ представлений о механизме возникновения пучения пород почвы и факторов, влияющих на его развитие	6
1.3 Анализ методов прогноза пучения пород почвы горных выработок	8
1.4 Структура, цель и задачи исследований по геолого- промышленному региону «Западный Донбасс»	17
2 ПОСТРОЕНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ «МАССИВ – ПЛАСТОВАЯ ВЫРАБОТКА»	20
2.1 Структура близлежащей углевмещающей породной толщи отрабатываемых угольных пластов Западного Донбасса	20
2.1.1 Общие положения	20
2.1.2 Литотип и мощность близлежащих породных слоев кровли угольных пластов	21
2.1.3 Строение и мощность разрабатываемых угольных пластов	22
2.1.4 Литотип и мощность близлежащих породных слоев почвы угольного пласта	25
2.2 Моделирование деформирования слабых горных пород в окрестности пластовой выработки	29
2.3 Обоснование параметров пластовых выработок и их крепи	35
Выводы	38
3 ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «МАССИВ – ПЛАСТОВАЯ ВЫРАБОТКА»	39
3.1 Обоснование параметров углевмещающего породного массива	39
3.2 Обоснование параметров пластовой выработки и крепи	45

	Выводы	48
4	ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕЙ ТОЛЩИ ПОРОД НА НДС СИСТЕМЫ «МАССИВ – ПЛАСТОВАЯ ВЫРАБОТКА»	49
4.1	Обоснование вариантов расчета НДС системы «массив – пластовая выработка» и методика проведения вычислительного эксперимента	49
4.2	Анализ НДС пород почвы пластовой выработки	55
4.2.1	Анализ вертикальных компонент напряжений	55
4.2.2	Анализ горизонтальных компонент напряжений	61
4.2.3	Анализ приведенных компонент напряжений	69
	Выводы	74
5	ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА РАЗВИТИЯ ПУЧЕНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ	76
	Выводы	85
6	ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СВЯЗИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОРОД ПОЧВЫ С ЕЕ ПУЧЕНИЕМ	86
6.1	Развитие методики вычислительного эксперимента	86
6.2	Установление закономерностей влияния структуры и свойств пород почвы угольного пласта на проявления пучения в пластовых выработках	91
6.2.1	Относительно однородные механические свойства близлежащих породных слоев почвы	91
6.2.2	Существенно неоднородные механические свойства близлежащих породных слоев почвы	98
7	ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОЧВЫ ПЛАСТОВЫХ ВЫРАБОТОК	102
7.1	Построение уравнений регрессии для расчета величины пучения пород почвы	102
7.2	Связь величины пучения пород почвы с глубиной размещения выработки	104
7.3	Разделение горно-геологических условий по характеру развития пучения и степени устойчивости пород почвы	105
8	МЕТОД ПРОГНОЗА И МОНИТОРИНГ ПОЧВЫ ПЛАСТОВЫХ ВЫРАБОТОК ШАХТ ЗАПАДНОГО ДОНБАССА	109
8.1	Общие сведения и алгоритм проведения расчетов	109
8.2	Формирование базы исходных данных к выполнению расчетов	110

8.3	Оценка состояния пород почвы и прогноз величины ее пучения	112
8.4	Пример выполнения прогнозного расчета пучения пород почвы пластовой выработки	113
	Выводы	118
9	ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ВМЕЩАЮЩЕГО МАССИВА И ПРИКОНТУРНЫХ ПОРОД КОНВЕЙЕРНОГО ШТРЕКА ПЛАСТА m_4^0 ШАХТЫ «БЕЛИЦКАЯ»	120
9.1	Построение, обоснование и тестирование геомеханической модели конвейерного штрека	120
9.2	Исследование и анализ НДС вмещающих конвейерный штрек горных пород	133
	Раздел II. ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ВМЕЩАЮЩИХ ПЛАСТОВЫЕ ВЫРАБОТКИ ПОРОД НА ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТАХ (500 м < H < 1000 м) ПОЛОГИХ ПЛАСТОВ ШАХТ ВОСТОЧНОГО ДОНБАССА	139
10	ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ВМЕЩАЮЩЕГО МАССИВА И ПРИКОНТУРНЫХ ПОРОД 5-го КОНВЕЙЕРНОГО ШТРЕКА БЛОКА №10 ПЛАСТА d_4 ШАХТЫ «КРАСНОАРМЕЙСКАЯ-ЗАПАДНАЯ №1»	139
10.1	Построение обоснованности и тестирование геомеханической модели 5-го конвейерного штрека	139
10.2	Исследование и анализ НДС вмещающих конвейерный штрек горных пород	148
10.2.1	Анализ углевмещающего породного массива	148
10.2.2	Особенности формирования поля напряжений в приконтурном породном массиве выемочного штрека	151
	Выводы	162
11	ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ПРИКОНТУРНЫХ ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРОД СБОРНОГО УКЛОНА №200 ПЛАСТА l_6^{H-2} ШАХТЫ «ДОЛЖАНСКАЯ-КАПИТАЛЬНАЯ»	165
11.1	Горно-геологические условия отработки угольного пласта l_6^{H-2}	165
11.2	Построение и обоснование геомеханической модели сборного уклона №200	170
11.3	Исследование и анализ НДС трещиноватого породного массива в окрестности выемочной выработки	172
11.3.1	Исследование НДС пород кровли выработки	172
11.3.2	Исследование НДС пород в боках выработки	173

11.3.3	Исследование НДС пород почвы выработки	174
	Выводы	175
Раздел III. ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ВМЕЩАЮЩИХ		
ПЛАСТОВЫЕ ВРАБОТКИ ПОРОД НА СВЕРХГЛУБОКИХ		
ГОРИЗОНТАХ ($H > 1000$ м) ПОЛОГИХ ПЛАСТОВ ШАХТ		
ВОСТОЧНОГО ДОНБАССА		
		177
12	ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ПРИКОНТУРНЫХ	
	ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРОД 75-го ВОСТОЧНОГО	
	КОНВЕЙЕРНОГО ШТРЕКА ПЛАСТА K_5^1 ШАХТЫ	
	«КРАСНЫЙ ПАРТИЗАН»	177
12.1	Горно-геологические условия отработки пласта K_5^1	177
12.2	Построение, обоснование и тестирование	
	геомеханической модели выемочной выработки	182
12.3	Исследование и анализ НДС вмещающих выемочную	
	выработку трещиноватых горных пород	187
12.3.1	Исследование НДС пород кровли выемочного штрека	188
12.3.2	Исследование НДС пород в боках выемочного штрека	190
12.3.3	Исследование НДС пород почвы выемочного штрека	191
12.3.4	Определение размеров зон нарушенных пород	
	вокруг выемочного штрека	192
	Выводы	194
13	ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ПРИКОНТУРНЫХ ПОРОД	
	ВОЗДУХОПОДАЮЩЕГО ШТРЕКА ГОРИЗОНТА 1200 м	
	ШАХТЫ «КРАСНЫЙ ПАРТИЗАН»	196
13.1	Построение, обоснование и тестирование	
	геомеханической модели воздухоподающего штрека	196
13.2	Исследование НДС приконтурных пород кровли	
	и боков воздухоподающего штрека	202
13.3	Исследование НДС пород почвы воздухоподающего	
	штрека	206
	Выводы	209
	ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК	211
	СОДЕРЖАНИЕ	220

Наукове видання

**Бондаренко Володимир Ілліч
Ковалевська Ірина Анатоліївна
Симанович Геннадій Анатолійович
Снігур Василь Григорович**

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ
ЗДИМАННЯ ПОРІД ПІДОШВИ ПІДГОТОВЧИХ
ВИРОБОК НА ПОЛОГИХ ПЛАСТАХ ДОНБАСУ**

Монографія

Російською мовою

Підписано до друку 18.03.14. Формат 701/290 1/16.
Папір офсет. Друк офсетний. Ум. друк. арк.
Обл.-вид. арк. . Тираж 300 прим. Замовлення №180314.

Видавництво ТОВ «ЛізуновПрес»
49127, м. Дніпропетровськ, вул. Н. Данченка, 30/166
Свідоцтво ДК №3597 від 06.10.2009 р.



БОНДАРЕНКО Владимир Ильич
заведующий кафедрой подземной
разработки месторождений Национального
горного университета, доктор технических
наук, профессор, заслуженный деятель
науки и техники, лауреат Государственной
премии Украины в области науки и техники.

КОВАЛЕВСКАЯ Ирина Анатольевна
профессор кафедры подземной
разработки месторождений
Национального горного университета,
доктор технических наук, лауреат
Государственной премии Украины
в области науки и техники.



СИМАНОВИЧ Геннадий Анатольевич
профессор кафедры подземной
разработки месторождений
Национального горного университета,
доктор технических наук.

СНИГУР Василий Григорьевич
директор ПСП «Шахтоуправление
Терновское» ПАО «ДТЭК Павлоград-
уголь», горный инженер.

