

РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ
ПОВЫШЕНИЯ
УСТОЙЧИВОСТИ
ГОРНЫХ
ВЫРАБОТОК
ШАХТ ЗАПАДНОГО ДОНБАССА



В.И. Бондаренко
А.В. Мартовицкий
И.А. Ковалевская
В.Г. Черватюк



**В.И. Бондаренко, А.В. Мартовицкий
И.А. Ковалевская, В.Г. Черватюк**

**РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ
ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ
ВЫРАБОТОК ШАХТ ЗАПАДНОГО ДОНБАССА**

Монография

**Днепропетровск
ТОВ «ЛізуновПрес»
2010**

УДК 622.261.27

Бондаренко В.І., Мартовицький А.В., Ковалевська І.А., Черватюк В.Г. **Розвиток наукових основ підвищення стійкості гірничих виробок шахт Західного Донбасу.** Монографія. – Дніпропетровськ: ТОВ «ЛізуновПрес», 2010. – 339 с.

Друкується відповідно до рішення Вченої ради Державного ВНЗ «Національний гірничий університет».

В монографії викладено аналіз розвитку застосування різницевих чисельних методів у механіці суцільного середовища і, зокрема, методів кінцевих та граничних елементів при моделюванні об'єктів з нелінійними механічними характеристиками; аналіз результатів багатофакторного обчислювального експерименту щодо граничного та позамежного стану всіх елементів системи «масив-кріплення»; аналіз процесу розвитку епюри переміщень контура пластової виробки, що розташована у шаруватому суттєво неоднорідному масиві слабких гірських порід. Встановлено залежності впливу механічних характеристик шарів порід та особливості впливу геометричних параметрів типових перетинів виробки з кріпленням серій КМП-А3 та КШПУ на розвиток епюри переміщень її периметру. На базі кореляційно-дисперсійного аналізу результатів багатофакторного комп'ютерного моделювання геомеханічних процесів навколо пластової виробки отримана низка рівнянь регресії щодо розрахунку переміщень на основних ділянках периметра виробки, що характеризують її експлуатаційну придатність.

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

Друкується за авторською редакцією.

Рецензенти: В.І. Бузило, д-р техн. наук, проф.
В.Г. Перепелиця, д-р техн. наук, проф.

© Бондаренко В.І., Мартовицький А.В., 2010
© Ковалевська І.А., Черватюк В.Г., 2010
© ТОВ «ЛізуновПрес», 2010

ВВЕДЕНИЕ

Стабильность функционирования угольной шахты во многом определяется состоянием подземных горных выработок, среди которых в наиболее сложных (с точки зрения интенсивности проявлений горного давления) условиях эксплуатируются пластовые (участковые и основные подготовительные) выработки, находящиеся в непосредственной технологической связи с очистными работами. Эта группа выработок уже по своему назначению размещается в весьма разнородной по свойствам слоистой геологической структуре, которая для условий шахт Западного Донбасса еще отличается низкими прочностными характеристиками пород. Поэтому обеспечение надлежащего эксплуатационного состояния подготовительных выработок шахт Западного Донбасса является важной технической задачей.

С другой стороны, в понятие «эксплуатационное состояние выработки» специалисты вкладывают комплекс вопросов, связанных в первую очередь с устойчивостью крепи, безопасностью передвижения людей и транспортных средств, надежностью схем проветривания участков шахтного поля. На основании учета этих факторов проектировщиками принимается решение о выборе наиболее рационального типового сечения выработки, в процессе которого необходимо достаточно надежно спрогнозировать эпюру перемещений ее контура под воздействием горного давления и оценить соблюдение комплекса конструктивно-технологических норм и требований правил безопасности.

В настоящее время в нормативных документах прогноз перемещений контура выработки осуществляется в интегральной форме (перемещения принимаются постоянными и усредненными по участкам контура выработки: кровля, бока и почва), на основании которого выбирается типоразмер крепи и выработки в целом, а оценка выполнения всего комплекса требований по обеспечению дальнейшего надлежащего эксплуатационного состояния выработки вплоть до ее погашения не проводится по всему ее периметру (с учетом реально существующей неравномерной эпюры перемещений): допустимые перемещения контура крепи, допустимые зазоры при движении транспорта, допустимые расстояния для прохода людей, допустимая потеря сечения при движении вентиляционной струи и т.п. Поэтому разработка прогноза перемещений контура пластовой выработки, расположенной в слоистом массиве слабых пород, для комплексной оценки ее эксплуатационного состояния является, безусловно, актуальной задачей повышения эффективности работы угольных шахт.

Высокая интенсивность проявлений горного давления на шахтах Западного Донбасса связывается специалистами со слабыми прочностными свойствами пород слоистой углевмещающей толщи, а перспективы развития этого региона – с расширением освоения месторождения угля в Западном направлении и переходом на более глубокие горизонты в действующих шахтах с усложнением горно-геологических условий однозначно указывают на

возрастающую актуальность прогнозирования состояния в окрестности выработки породного массива для обоснованного принятия технических решений по обеспечению надежного ее функционирования. Но существующие нормативные методики расчета проявления горного давления (в которых накоплены и систематизированы результаты обширных экспериментальных исследований) нацелены, в конечном итоге, на выбор крепи горной выработки, обеспечивающей ее устойчивость, а прогнозирование равномерного по участкам породного контура выработки (кровля, бока, почва) перемещения не соответствует наблюдаемой в шахтных условиях существенно неравномерной эпюре смещений пород на этих участках. Задача ставится более комплексно – прогнозировать в целом эксплуатационное состояние пластовой выработки, где оценка ее устойчивости является лишь одним из факторов. Не менее важной является оценка надежности и безопасности передвижения людей и транспортных средств, схем проветривания соответствующих участков шахтного поля. Указанные факторы требуют прогнозирования перемещений не отдельных участков породного контура выработки, а эпюры перемещений ее внутреннего контура в любой точке периметра. Тогда выполнение любого требования эксплуатационных норм и правил безопасности легко оценить при сравнении прогнозируемых эпюр перемещений внутреннего контура выработки и размеров принятого проектом конкретного типового сечения с соответствующими нормируемыми зазорами, расстояниями и площадью поперечного сечения.

Такая комплексная постановка задачи требует максимально адекватного отражения процессов сдвижения слоистого массива слабых пород в окрестности пластовой выработки, а именно: учет совместности деформирования массива и крепи реальной пространственной геометрии с межрамным ограждением и забутованным закрепным пространством; моделирование максимально приближенной к существующей структуре слоистой углевмещающей толщи с неоднородными механическими характеристиками и нарушенными контактами между слоями в окрестности выработки; учет параметров полной диаграммы деформирования каждого из элементов системы «массив-крепь».

Методологической основой прогнозной оценки эксплуатационного состояния пластовых подготовительных выработок послужили следующие результаты исследований:

– для условий шахт Западного Донбасса обоснован весь комплекс исходных горно-геологических и горнотехнических параметров для максимально достоверного моделирования процессов сдвижения слоистой углевмещающей толщи в окрестности пластовой выработки. Размеры модели выбраны с учетом несущественного влияния выработки на ее границах, где выполняются исходные негидростатические условия распределения вертикальных σ_y и горизонтальных σ_x компонент напряжений. Установлено, что при слабых связях между соседними слоями действующие касательные напряжения

τ_{xy} их разрушают в окрестности выработки и смежные породные слои деформируются с проскальзыванием друг относительно друга. Этот фактор существенно изменяет поле напряжений и учтен в разработанной модели, тестирование которой на предмет соответствия результатов расчета современным представлениям геомеханики сдвига массива вокруг выработки подтвердило целесообразность использования модели;

– по стратиграфическим колонкам рабочих угольных пластов шахт Западного Донбасса построено три наиболее характерных (87...92% случаев) структуры углевмещающей толщи (исключая тонкие прослойки мощностью 0,05...0,3 м), анализ поля напряжений в которых позволил с достаточной для горнотехнических расчетов точностью обосновать единую усредненную структуру, погрешность которой не превышает 10% во всем диапазоне изменения геомеханических параметров вмещающего массива. Произведен расчет группы тестовых моделей по вариантам размещения выработки относительно угольного пласта и другим фиксируемым параметрам для выбора их значений, формирующих НДС системы в пределах допустимой погрешности;

– оценено влияние деформационных характеристик близлежащих породных слоев на НДС системы и установлено, что несмотря на их различные сочетания в кровле и почве пластовой выработки размеры зон предельного состояния (в основном от действия растягивающих σ_y и σ_x) достаточно стабильны и охватывают два породных слоя в кровле и один – в почве. В боках выработки наблюдается ярко выраженная область опорного давления от действия сжимающих напряжений, размеры которой определяются глубиной разработки и прочностными характеристиками близлежащих породных слоев. В рамной крепи снижение приведенных напряжений σ (по которым производится ее прочностной расчет) происходит в случае залегания в непосредственной кровле хотя бы одного породного слоя повышенной жесткости.

– расчет НДС системы «массив-крепь» – выполнен при условии нарушенных контактов между слоями и моделирования полных диаграмм деформирования всех составляющих элементов: для каждого из породных слоев и угольного пласта модели использована общепринятая в геомеханических задачах полная диаграмма, состоящая из трех линейных участков (упруго-пластическая стадия с модулем деформации E , разупрочнение с модулем спада M , разрыхление на стадии «руинного» разрушения с остаточной прочностью $\sigma_{сж}^o$); для рамной крепи использована реальная диаграмма нагружения стали Ст.5, учитывающая площадку текучести и стадию упрочнения; полная диаграмма породной забутовки в закрепном пространстве определена на основе существующих шахтных экспериментов. Выполнен обширный комплекс расчетов по 27 вариантам сочетаний модуля деформации $E_i^{K,II}$ близлежащих породных слоев, 27 вариантам сочетаний расчетного сопротивления

сжатию $\sigma_{сж_i}^{K,П}$ (с учетом понижающих коэффициентов на различного рода ослабляющие факторы в массиве в соответствии с нормативными методиками), 64 вариантам сочетаний параметров $M_i^{K,П} / E_i^{K,П}$ и $(\sigma_{сж_i}^{K,П})^0 / \sigma_{сж_i}^{K,П}$ (индексы $i = 1, 2$ нумеруют породные слои, начиная от угольного пласта, а индексы « $K, П$ » обозначают принадлежность слоев к кровле или почве);

– различные сочетания прочностных и деформационных характеристик по каждому из близлежащих породных слоев обуславливают разную степень их влияния на изменение поля напряжений и перемещений с ростом глубины H расположения выработки. Определяющим фактором является вид состояния близлежащих породных слоев и угольного пласта при конкретной величине H (допредельное, предельное, запредельное): при повышенных прочностных характеристиках близлежащих породных слоев их частично допредельное состояние предопределяет связь напряжений и перемещений с параметром H , близкую к линейной; вариация $E_i^{K,П}$ в интервале $(0,3...1) \cdot 10^4$ МПа изменяет напряжения до 55%, а перемещения до 131%; при пониженных прочностных характеристиках зависимость НДС массива от параметра H становится существенно нелинейной с наступлением предельного состояния хотя бы одного из близлежащих породных слоев, в запредельном состоянии рост перемещений усиливается, а напряжений уменьшается; при этом деформационные характеристики слоев несущественно влияют на поле напряжений, а смещения контура выработки, особенно в ее почве, могут изменяться до 2,5 раз и в некоторых вариантах на глубинах $H = 500...600$ м происходит существенное заполнение разупрочненной породой полости выработки;

– НДС рамной крепи и закономерности его изменения с увеличением глубины разработки H являются нелинейными, особенно при переходе близлежащих породных слоев в запредельное состояние; затухание роста функции обусловлено появлением и увеличением зон пластических деформаций в раме; этот процесс стабильно начинается в нижней части стоек рамы (они изгибаются в полость выработки) и распространяется с увеличением H почти на весь ее контур (за исключением локальных областей допредельного состояния в своде); образование системы пластических шарниров по контуру рамной крепи способствует (в ряде вариантов) развитию таких ее перемещений, которые исключают возможность дальнейшей эксплуатации выработки;

– для обоснованного выбора рамной крепи пластовой выработки установлены связи ее НДС с основными влияющими геомеханическими параметрами и эта задача исследований реализована на базе установленных закономерностей посредством корреляционно-дисперсионного анализа результатов расчета НДС системы «массив-крепь» по сформированной многофакторной базе обширного массива различных вариантов сочетаний гео-

механических параметров. Для полноценного анализа учтены еще два фактора – переменная площадь сечения выработки и ее форма, зависящая от типа применяемой рамной крепи в пластовых выработках шахт Западного Донбасса: КМП-А3 или КШПУ. С целью всестороннего охвата диапазона изменения типовых сечений участков и основных подготовительных выработок был проведен весь комплекс предыдущих расчетов НДС системы для шести типоразмеров: КМП-А3-9,2; 13,8; 18,3 и КШПУ-9,5; 14,4; 17,7;

– установлена устойчивая степенная закономерность связи S_{ce} с перемещениями всех участков внутреннего контура выработки с переменным показателем степени на разных участках этого контура, что принципиально отличается от методологии нормативных документов, где S_{ce} учитывается линейно возрастающим поправочным коэффициентом, а вид крепи (КМП-А3 или КШПУ) единым коэффициентом ее работоспособности на все горно-геологические условия поддержания выработки;

– выявлены отличия в величине и интенсивности роста перемещений (с увеличением S_{ce}) для видов крепей серии КШПУ в сравнении с КМП-А3: пониженная в кровле за счет уменьшенного радиуса свода верхняка и криволинейной части стойки; повышенная в боках и, особенно, в опорах стоек рамы за счет увеличенной длины стоек и высоты выработки в целом; повышенное вдавливание стоек рамы в почву; примерно одинаковая величина максимума пучения почвы;

– указанные особенности развития перемещений для крепей серии КМП-А3 и КШПУ преимущественно компенсируют друг друга (максимум отклонений 10,6%) при расчете относительной потери сечения $\Delta S_{ce} / S_{ce}$ и наблюдается стабильная закономерность $\Delta S_{ce} / S_{ce} (H)$ с практически постоянным показателем степени для разных типоразмеров сечения и видов применяемых крепей. Поэтому относительная величина потери сечения фактически определяется только глубиной расположения выработки и механическими характеристиками близлежащих породных слоев;

– получены уравнения регрессии для расчета перемещений всех участков внутреннего контура выработки, по которым оценивается ее эксплуатационная пригодность;

– оценка достоверности прогноза перемещений контура крепи выработки выполнена по параметрам U_{ce}^y , U_{np}^x и U_{noc}^y , сравниваемых с соответствующими равномерно распределенными перемещениями в кровле, боках и почве по действующим нормативным методикам и наиболее известным аналитическим методам расчета по полной диаграмме деформирования породы. Сравнительный анализ показал, что, благодаря учету основных механических характеристик полной диаграммы деформирования всех элементов системы, предлагаемая методика обладает достаточно высокой общностью прогноза перемещений контура пластовой выработки;

– рассмотрены четыре основных позиции надежной и безопасной эксплуатации пластовой выработки в соответствии с требованиями нормативных документов: устойчивость рамной крепи; условия безопасного движения транспортных средств; условия безопасного прохода людей; надежная вентиляция участков шахтного поля. Для каждой из позиций сформулирован комплекс критериев в виде системы из 13 неравенств, в которые расчетными параметрами входят величины прогнозируемых перемещений и относительной потери сечения выработки по установленным зависимостям. Итоговый результат исследований представлен в виде алгоритма многофакторной оценки выбранного проектом типового сечения пластовой выработки в конкретных горно-геологических и горнотехнических условиях ее эксплуатации.

1. РАЗВИТИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГЕОМЕХАНИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ «МАССИВ-КРЕПЬ»

1.1. СОВРЕМЕННЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА НДС НЕОДНОРОДНЫХ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Современные методы прогноза проявлений горного давления постоянно совершенствуются в направлении более полного учета особенностей взаимодействия крепи с вмещающим выработку породным массивом и его физико-механических свойств. Эти исследования крайне важны для развития общих представлений о взаимодействии системы «массив-крепь» и изыскания оптимальных параметров данного взаимодействия, принимая во внимание конечную цель – обеспечение устойчивости выработки малозатратными технологиями. То есть, процесс крепления должен быть неразрывно связан с геомеханикой приконтурного породного массива.

Существующие задачи геомеханики в последнее время сделали переход от упруго-пластической модели [1-3] к дальнейшему учету свойств горных пород в предельной и запредельной стадиях деформирования [4-19], даже с учетом на кровле водонасыщенного слоя (плывуна) [20].

Увеличение количества учитываемых факторов неумолимо приводит к усложнению задач геомеханики, в связи с чем большинство их выполнено в плоской постановке. В то же время опыт поддержания горных выработок указывает на изменчивость прежде всего механических свойств горных пород по длине выработки, что необходимо учитывать в задачах геомеханики. Это обстоятельство способствовало развитию вероятностного подхода [21-23] к оценке устойчивости горных выработок при случайных нагрузках на крепь.

В работе [24] на основе вероятностно-статистической модели выполнено определение параметров рамных крепей протяженных выработок с учетом затрат на их поддержание в условиях случайного воздействия геомеханических факторов.

Другой не менее важной группой задач геомеханики является учет реального расположения выработок и их геометрии, особенно в условиях влияния очистных работ, то есть переход от традиционной плоской постановки к пространственной.

Не секрет, что решение пространственных задач связано со значительными математическими трудностями даже в упругой постановке для изотропного массива и при простейших формах поперечного сечения выработки [25-37]. И там, где можно обойтись традиционной плоской постановкой задачи, необходимо ею и пользоваться. Но парадокс ситуации заключается в том, что для аргументированного обоснования допустимости решения

плоской задачи взамен пространственной необходимо иметь оба решения и путем их сравнения при выбранной погрешности (из нужд практики) определять область условий, где плоская постановка задачи целесообразна. Поэтому обязательным и необходимым является анализ существующих решений пространственных задач и оценка возможности их применения для реализации поставленной цели исследований.

Ситуация в части исследований геомеханических процессов в окрестности горных выработок сложилась таким образом, что наиболее представительные решения пространственных задач касаются сопряжений горных выработок, взаимовлияния близко расположенных выработок или выработок небольшой протяженности.

На наш взгляд, наиболее полный анализ решений пространственных задач представлен в работе [38], где отмечаются огромные трудности учета анизотропии свойств горных пород и неоднородности их строения [39, 40].

Принцип совместности деформаций массива и крепи приводит к выводу о необходимости расчета крепей как пространственной конструкции, то есть учета изменчивости реакции крепи не только в поперечном, но и продольном направлении выработки. С этой точки зрения представляет интерес анализ современных методов расчета различных типов крепей горных выработок, которые, особенно при упрочнении приконтурных пород анкерами или твердеющими смесями, обладают ярко выраженной пространственной неоднородностью геометрических, механических и силовых параметров.

Таким образом, в последние десятилетия наметилась устойчивая тенденция развития исследований в области устойчивости подземных горных выработок, связанных, прежде всего, с учетом различного рода неоднородности геомеханических систем. Под этим термином мы понимаем следующие взаимосвязанные особенности современных геомеханических моделей.

Во-первых, учет совместного деформирования породного массива и крепи, отличающихся как по своим геометрическим параметрам, так и (что более важно) механическим характеристикам.

Во-вторых, сложная геометрия большинства конструкций крепей (рамная, анкерная, рамно-анкерная, крепь с тампонажем закрепного пространства и тому подобное), для более реального моделирования которых необходима пространственная постановка задачи. Зачастую крепь может состоять из неоднородных материалов, особенно, если учесть межрамное ограждение и забутованное закрепное пространство.

В-третьих, неоднородность (анизотропия) механических характеристик породного массива в пределах одного типа горной породы.

В-четвертых, моделирование реальной структуры массива приводит к необходимости учета его слоистости и трещиноватости, которые обладают пространственными характеристиками расположения. С учетом определенного размещения выработки в пространстве отдельные участки ее длины могут пересекать породы с разной структурой и механическими свойствами.

В-пятых, повышение достоверности модели связано с учетом не только упруго-пластических и реологических свойств массива и материала крепи, но и с исследованием предельной и запредельной стадии деформирования, то есть с неоднородностью поведения среды при различной степени ее нагружения.

Перечисленные факторы неоднородности реальной геомеханической системы в силу своего пространственного характера желательнее рассматривать в трехмерной постановке, но по причине серьезных математических трудностей решение задач в качестве некоторого приближения также имеет существенное научно-практическое значение.

Перечисленные факторы неоднородности геомеханических систем в той или иной степени исследуются большинством отечественных и зарубежных ученых и специалистов.

Ряд задач геомеханики и методов их решения на основе аналитического подхода рассмотрены в работе [41]. Автор подробно рассмотрел различные методики учета трещиноватости горных пород в аналитических методах решения задач геомеханики. При этом в ряде решений учитывались масштабный эффект и взаимное влияние систем трещин. Ярким примером является задача об устойчивости подземной галереи, пройденной в трещиноватых породах с наклонной слоистостью. В данной задаче использована теория прочности Кулона-Мора. Трещиноватость моделируется введением в расчетную схему взвешивающего (порового) давления, а влияние угла падения породных слоев на распределение напряжений учитывается путем введения соотношения между ним и углом внутреннего трения пород. В последующем Талобр показал оправданность применения подобного подхода при расчете анкерного крепления выработок на глубинах до 100м. Все рассматриваемые автором методы решения задач сводились к плоской постановке и не учитывали влияние элементов крепи на получаемый результат.

Автор [42] приводит решение задач об устойчивости крепи тоннелей, представленной сплошной обделкой постоянной толщины. Главной особенностью в рассматриваемых задачах является влияние геометрических параметров контура выработки на распределение напряжений в обделке тоннеля. Влияние горного массива в большинстве примеров рассматривается как внешняя нагрузка, заданная сложным образом. Поэтому в ходе решения применялись классические подходы механики сплошной среды, хорошо описывающие поведение материала крепи. Основная часть задач решена в условиях плоской осесимметричной постановки, однако автор уделил особое внимание случаям несимметричной нагрузки, воспринимаемой крепью. В работе не рассматривалось поведение элементов крепи за пределом прочности материалов.

Детальный анализ аналитических методов моделирования поведения горного массива вокруг выработок в упругом, предельном и запредельном состоянии пород содержит работа [43]. Авторы учитывают физическую неоднородность горного массива. Однако процедуры расчета НДС горного

массива и элементов крепи не взаимосвязаны на уровне совместного математического моделирования. Решения для горного массива приведены в обобщенном виде и не учитывают особенностей локальных нарушений в его среде. Большое внимание уделено методам расчета крепи, за основу которых взяты классические математические модели конструкций, используемые в строительной механике.

Результаты решения задачи об устойчивости трех параллельно пройденных выработок круглого поперечного сечения [44] получены в плоской постановке для упругой изотропной среды в условиях идеального контакта горного массива и крепи выработок. Крепь выработок представлена концентрическими окружностями постоянной ширины. Аналитическое решение получено на основе метода Шермана с использованием аппарата теории функций комплексного переменного и комплексных рядов. Полученные результаты и их сравнение с натурными наблюдениями дали право авторам заявить о том, что «разработанная методика позволяет приближено учесть влияние отставания крепления от забоя, последовательности проведения выработок и сооружения слоев обделок».

Методика вычисления НДС горного массива вокруг контура выработки круглого сечения, предложенная в [45], заключается в вычислении параметров взаимодействия крепи выработки и окружающих ее пород как совокупности концентрических окружностей. Авторами предложена универсальная формула вычисления контактных давлений на границах слоев крепи с учетом изменчивости модулей упругости пород по радиусу выработки. Изменение физико-механических характеристик горного массива представляются набором концентрических окружностей, каждая из которых дискретно выделяет область с иными характеристиками материала. По мнению авторов, подобный подход позволяет в упругой постановке достаточно эффективно решать задачи, связанные с переходом пород горного массива в предельное и запредельное состояние вокруг выработок произвольного сечения.

Авторы [46] рассмотрели возможность решения обратной задачи для определения НДС горного массива по полученным в результате натурального эксперимента деформациям породного контура выработки. Подобный подход позволяет получить адекватную картину полей напряжений в окрестности выработки только в упругой постановке и не всегда может иметь практическую ценность при решении прикладных задач устойчивости горных выработок. Но, как показано авторами, данная методика может быть применена для анализа изменения полей напряжений вокруг выработок произвольного сечения с учетом неоднородности свойств окружающего породного массива. При выполнении расчетов крепь выработки описывается как одна из компонент напряжений, присутствующая на поверхности горного массива, образованной контуром выработки.

Работа [47] содержит решение упруго-пластической задачи в плоской постановке вокруг выработки круглого сечения. В основу математической модели положено представление о линиях скольжения, возникающих при пе-

переходе пород горного массива из упругого состояния в пластическое. Подобная постановка задачи связана с необходимостью преодоления нелинейности масштабного эффекта в породах горного массива. Развитие задачи, как показано авторами, позволяет вычислять НДС горного массива вокруг выработок произвольного сечения при помощи численных методов, основанных на данной математической модели. Еще одним положительным фактором представленного метода расчета является возможность получения однозначного результата при учете ниспадающей ветви диаграммы «напряжение-деформация».

Для получения оптимальных параметров установки рамной крепи в [48] использован статистический подход определения воздействия на элементы крепи приконтурного горного массива. Постановка задачи выполнена для случая горизонтальных выработок, пройденных в однородном изотропном горном массиве. Основными характеристиками изменения давления горного массива на отдельный элемент крепи выбраны два вектора: математических ожиданий и дисперсии, описывающие вариации физико-механических характеристик приконтурных горных пород. Основным недостатком данного подхода является сложность получения однозначных статистических показателей без проведения дополнительных натуральных исследований в конкретных горно-геологических условиях.

Решение, предложенное авторами [49, 50], позволяет получить величину максимальных главных напряжений на контуре контакта «крепь-горный массив» при решении упруго-пластической задачи в плоской постановке. Основным ограничением предложенного метода решения является жесткая привязка к типу крепи (монокольцевая) и геометрии контура выработки (окружность). При этом горный массив рассматривается как однородная изотропная среда. В начале расчет строится на определении изменения главных напряжений от бесконечно удаленной точки горного массива к центру выработки (классическая задача – пластина с круглым отверстием). На основе полученных значений напряжений определяются перемещения горного массива на контуре идеального контакта «крепь-горный массив». Затем на основе решения задачи Ламе о деформациях в системе концентрически совмещенных колец, определяются показатели перемещений на внешнем контуре крепи. Применяя принцип суперпозиции, авторы получают значения «реальных» деформаций, по которым вычисляют величины максимальных напряжений. Данный метод, как и предыдущий, требует значительных временных затрат на проведение лабораторных и натуральных экспериментов, результаты которых должны гарантировать адекватность используемых в математической модели эмпирических коэффициентов.

Расчетная схема, учитывающая воздействия сейсмических волн и тектонических напряжений на НДС горного массива, примыкающего к выработке произвольного сечения, предложена в работе [51]. Задача решена в плоской постановке для однородной изотропной среды при условиях упругих деформаций. Результатом расчетов являются границы зон неупругих деформаций,

определяемые из учета сочетания воздействий сейсмических волн (сжатия-растяжения и сдвига), направления которых заранее не известно. Решение состоит из двух частей: в первой моделируется поведение среды, испытывающей на бесконечности двухосное неравнокомпонентное сжатие (воздействии длинной продольной волны произвольного направления); во второй – среда подвержена чистому сдвигу на бесконечности (воздействие поперечной, произвольно направленной волны). Для учета многообразия сейсмических воздействий рассматривается до восьми комбинаций волн в одном решении. Результаты были сравнены с аналитическими методами расчета определения зон неупругих деформаций. Полученные результаты сравнений показали, что под воздействием сейсмических волн зоны неупругих деформаций могут увеличиваться на 50%.

Решение, позволяющее оценить устойчивость кровли очистных камер в процессе отработки месторождений и последующей их эксплуатации, представлено [52] в виде набора эмпирических формул, каждая из которых описывает один из техногенных или геомеханических факторов, влияющих на состояние выработки. Часть формул позволяют выполнить решение только для условий упругих деформаций, а отдельные, описывающие поведение горных пород вокруг выработки, учитывают явление ползучести. Предложенный подход позволяет учитывать воздействие на НДС системы заполнителя выработанного пространства – насыщенного рассола или глинисто-солевого шлама. При этом изменение состояния системы можно анализировать как при ликвидации выработанного пространства, так и в случае снятия давления заполнителя при его откачке на поверхность или в другие подземные пустоты.

В работах [53, 54] автор предлагает рассматривать НДС системы «крепь-горный массив» исходя из уравнений равновесия сингулярных точек, располагающихся на контуре выработки и находящихся под воздействием начальных граничных условий, характерных для конкретного случая проведения выработки. Поле напряжений рассчитывается в результате анализа получаемых в ходе решения перемещений, величина которых не должна выходить за пределы упругого представления о поведении материала. Несмотря на утверждение автора об универсальности предлагаемого метода, отсутствие возможности учета неоднородности горного массива вблизи контура выработки и независимость получаемых результатов от типа крепи, указывает на локальный характер предложенной методики. Хотя, как утверждает автор, получаемые значения хорошо согласуются с результатами натуральных наблюдений, проведенных для выработок прямоугольного сечения в условиях крепких и весьма крепких горных пород.

Методика анализа поведения анкеров как элементов рамно-анкерной крепи, устанавливаемой в выработках произвольного сечения, изложена в работе [55]. Задача решена в плоской постановке и не учитывает запредельное поведение материала элементов расчетной схемы. Напряженно-деформированное состояние анкеров и приконтурной зоны горного массива определяется из условия расслоения пород кровли выработки. Предложенное

решение позволяет определять оптимальные показатели установки анкеров для минимизации зоны расслоения пород над сводом выработки. Для различных условий проведения выработок, закрепляемых комбинированной рамно-анкерной крепью, получены эмпирические зависимости, основанные на результатах математического эксперимента.

Авторы [56] предложили модель оценки конструктивных особенностей крепи в условиях изотропного однородного горного массива вблизи выработки сводчатой формы. основополагающим фактором при проведении расчетов выбрана форма контура крепи и усредненные физико-механические характеристики горного массива, примыкающего к нему. На основе получаемых результатов осуществлялся выбор типа крепи (рамная, рамно-анкерная и анкерная), а так же плотность ее установки вдоль конкретной горной выработки.

Влияние отдельного анкера на НДС системы «крепь-породный массив» рассмотрено в работе [57]. Для анкера задача решалась в осесимметричной постановке с учетом упруго-пластического поведения его конструктивных элементов. Окружающий горный массив из условий постановки задачи не выходил за пределы упругого поведения материала. В качестве модели рассматривался беззамковой сталеполимерный анкер. Автор получил результаты, позволяющие путем предварительных расчетов получить физико-механические и геометрические характеристики анкеров, используемых при возведении рамно-анкерной крепи в выработках, пройденных на больших глубинах. Сама методика интересна тем, что при расчете анкеров, в математической модели точно воспроизводятся другие элементы крепи, а породный массив рассматривается как однородное упругое тело.

Авторы [58, 59] предложили аналитическое решение оценки устойчивости горных выработок с учетом зон нарушения сплошности. Решение задачи выполнено не только в плоской, но и в объемной постановке применительно к оценке НДС в области сопряжения двух горных выработок. Приведенная задача решалась методом граничных интегральных уравнений, в котором напряжения от компенсирующей нагрузки определялись путем интегрирования в пределах поверхности решения Кельвина о силе в бесконечном пространстве. Массив горных пород, в котором сооружается выработка, считается слоистым, а в качестве критериев перехода материала в разрушенное состояние используется критерий прочности Мора. Результатом расчета являются поля нормальных и касательных напряжений, ориентированных по поверхности ослабления вокруг выработки. Предложенный метод позволяет рассматривать выработки любого поперечного сечения, имеющие локальные геометрические и механические нарушения, что позволяет на уровне математической модели учитывать отдельные особенности взаимодействия крепи и поверхности горного массива, образованного контуром выработки.

Для оценки напряженно-деформированного состояния горного массива вблизи выработки сводчатой формы использован подход [60, 61], основанный на применении комплексных потенциалов многосвязных областей и метода конформных отображений. Задача решена в упругой постановке на основе

плоской модели для бесконечного многосвязного анизотропного тела с конечным числом эллиптических полостей. Одной из наиболее интересных прикладных задач, решенных на основе данного подхода, стала задача об анализе снижения концентраций напряжений в приконтурном горном массиве за счет проведения разгрузочных полостей. Разгрузочные полости и сама выработка моделировались эллипсами различной кривизны. Расчеты выполнялись для различных комбинаций размеров и местоположения разгрузочных полостей, а получаемыми результатами стали показатели минимизации градиентов напряжений на контуре выработки. Данный метод решения задачи не учитывает наличия структурных неоднородностей горного массива, пересекающих разгрузочные полости, что значительно сужает сферу его применения.

Одна из разновидностей беззамковой анкерной крепи – трубчатый анкер, устанавливаемый в шпуре взрывным способом, исследована в работе [62], где дано аналитическое описание как процесса динамического деформирования системы «заряд взрывчатого вещества-заполнитель-металлический цилиндр-породные стенки шпура» в период установки анкера, так и статического взаимодействия ее элементов при последующей работе по противодействию проявлению горного давления. Результаты решения упруго-пластической задачи в комплексе с критериями оптимизации НДС системы позволили установить рациональные соотношения взрывчатых характеристик заряда, геометрических и механических параметров системы, при которых трубчатый анкер достигает максимальной реакции сопротивления в конкретных горно-геологических условиях поддержания выработки.

Расширению области применения трубчатых анкеров на слабые горные породы угольных шахт Западного Донбасса посвящены работы [63, 64], в которых раскрыт и аналитически описан механизм силового взаимодействия элементов триединой системы «расширяющийся минеральный заполнитель-стенки шпура», обеспечивающий достижение высокоэффективного режима постоянно максимального сопротивления трубчатого анкера на протяжении всего периода его податливости при упрочнении слабых горных пород. Расчет НДС системы выполнен в упруго-пластической постановке в цилиндрических координатах, на основе которого создан метод расчета рациональных конструктивно-технологических параметров трубчатого анкера, учитывающий реальную эпюру распределения смещений приконтурных пород в окрестности выработки и воздействие расширяющегося заполнителя на внутреннюю поверхность металлической трубы.

Для всего класса беззамковой анкерной крепи выполнено обоснование обобщенной геомеханической модели [65] на основе раскрытия общих черт механизма силового взаимодействия беззамковых конструкций анкеров с приконтурным породным массивом.

Здесь апробировано моделирование весьма дискретного взаимодействия анкеров на вмещающие выработку породы с помощью математического аппарата методов многих масштабов и ступенчатых импульсных функций, что выгодно отличает данный метод от широко распространенных приемов ус-

реднения сосредоточенного воздействия анкеров на всю площадь поверхности выработки между соседними анкерами. Вполне естественно, что такая постановка исследований выполняется только в пространственной постановке.

Дальнейшее развитие данного подхода осуществлено в работах [66-70], где разработана методология аналитического исследования пространственных систем «массив-крепь», характеризующихся одновременной пространственной неоднородностью ее силовых, геометрических и механических параметров. Такая постановка задачи продиктована стремлением обобщить методику расчета рациональных параметров на основные наиболее широко применяемые конструкции крепей: бетонную, металлобетонную, анкерную, рамно-анкерную, рамную, крепь с тампонажем закрепного пространства.

Установленные закономерности расширяют представления о геомеханических процессах в окрестности горной выработки, а именно:

- повышение устойчивости горных выработок путем упрочнения приконтурных пород и управления геомеханикой взаимодействия системы «массив-упрочненные породы-крепь» осуществляется при развитии зоны неустойчивого равновесия пород в кровле выработки более двух радиусов, что обусловлено процессом разупрочнения вмещающего массива выше верхнего предела остаточной прочности, имеющей обратно пропорциональную связь с углом внутреннего трения породы и логарифмическую зависимость от радиуса зоны предельного равновесия. Это позволило установить область горно-геологических условий экономической целесообразности усиления поддерживающей крепи путем упрочнения приконтурных пород;

- область обязательного учета периодических изменений зоны неустойчивого равновесия вдоль выработки при расчете параметров подсистемы «упрочненные породы-крепь» ограничена нижним пределом длины периода изменения ее реакции, имеющим комбинированную логарифмическую зависимость от степенной функции ее амплитуды периодического изменения и относительно радиуса предельного равновесия. Это позволяет за пределами установленной области существенно упрощать решения задач путем применения плоских расчетных схем взаимодействия системы «массив-упрочненные породы-крепь»;

- верхняя граница длины периода изменения реакции подсистемы «упрочненные породы-крепь» имеет степенную зависимость от угла внутреннего трения и остаточной прочности породы на сжатие, при которой несущественно взаимовлияние размеров зон неустойчивого равновесия в сечениях с минимальной и максимальной нагрузками на подсистему. Это позволяет при расчете опасного сечения подсистемы, рассматривать его вне зависимости от амплитуд периодического изменения реакции и нагрузки вдоль выработки;

- ресурсосберегающие условия достижения равнопрочности комбинированной крепи, образованной при тампонаже закрепного пространства, реализуются за пределами граничного соотношения прочностных характеристик по экспоненциальной и степенной зависимостям от толщин и модулей де-

формации упрочненных пород и обратно пропорциональной логарифмической зависимости от соотношения смещений породного контура.

Учет максимально возможного количества значимых геомеханических факторов отражают одну сторону проблемы повышения устойчивости горных выработок. Другая сторона видится в ресурсосберегающих технологиях поддержания подземных выработок на основе управления силовым взаимодействием системы «крепь-горный массив». Этому направлению посвящены работы [71, 72], где предложен алгоритм управления состоянием массива и крепи с помощью так называемых управляющих элементов, оптимизирующих деформационно-силовую характеристику крепи в соответствии с характером проявления горного давления. Сами управляющие элементы имеют разнообразное конструктивное исполнение в известных наиболее широко применяемых типах крепей, например: деформационно-осадочные швы, слои переменной по контуру жесткости, узлы податливости, шарниры, анкеры, напрягающие стяжки, дополнительные опоры, опорные плиты и т.п.

Таким образом, предложено на основе оптимизации параметров управляющих элементов регулировать деформационно-силовую характеристику широко применяемых типов крепей в направлении достижения наиболее рациональных режимов взаимодействия крепи с породным массивом.

Результаты аналитических исследований НДС системы «крепь-горный массив» позволили автору [71] сформулировать ряд заслуживающих внимание выводов:

- методологической основой создания и расчета высокоэффективных крепей горных выработок является подход, связывающий в единую систему параметры состояния породного массива и крепи через группу критериев оптимизации режимов их взаимодействия;

- достоверность геомеханических методов прогноза проявлений горного давления в значительной степени зависит от учета действия веса пород в зоне неупругих деформаций и асимметричного характера распределения реакции крепи по контуру выработки. Это достигается применением комбинированного метода, включающего две составляющие: определение напряженно-деформированного состояния вмещающего выработку породного массива на базе решения контактной задачи его взаимодействия с крепью горной выработки без учета веса пород в зоне неупругих деформаций и определение нагрузки на крепь на базе решения задачи устойчивости предельного состояния приконтурного породного массива;

- максимальная устойчивость крепи функционально связана не только с размерами, но и формой области неустойчивых пород, зависящих от функции распределения деформационно-силовой характеристики по контуру крепи, которая является определяющим параметром при разработке и расчете крепи;

- эффективность работы крепи зависит от степени реализации адаптивных свойств функций распределения ее деформационно-силовой характеристики применительно к конкретным горно-геологическим условиям и оп-

ределяется возможностью оперативного управления механическими и геометрическими параметрами элементов конструкции;

– напряженно-деформированное состояние монолитных крепей горных выработок в значительной степени зависит от анизотропии механических свойств ее материала не только по толщине, но и по контуру крепи, что позволяет более полно удовлетворять критерию равнопрочности конструкции крепи;

– повышение несущей способности рамных крепей реализуется при условии переменного чередования максимумов изгибающего момента разных знаков и их равенства между собой по абсолютной величине.

В развитие данного направления выполнены исследования [73, 74] оптимизации параметров комбинированной крепи, образованной при тампонаже закрепного пространства. Исследование НДС многослойной крепи выполнено с помощью математического аппарата метода многих масштабов, что позволило изучить влияние произвольных функций распределения деформационных свойств по контуру отдельных слоев комбинированной крепи на ее НДС и деформационно-силовую характеристику. В данных исследованиях неоднородность механических свойств тампонажного камня по контуру крепи является инструментом достижения рациональных режимов работы комбинированной крепи в целом. Основные научные результаты сводятся к следующему:

– обоснован новый способ тампонажа закрепного пространства горных выработок, обеспечивающий равнопрочность всех основных грузонесущих элементов комбинированной крепи за счет возведения тампонажной оболочки с переменной деформативностью по контуру выработки. При этом установлены зависимости для определения рациональной функции распределения модуля деформации тампонажного слоя по контуру выработки;

– обоснован критерий выбора рационального отставания тампонажных работ от проходческого забоя, учитывающий не только силовые, но и деформационные параметры рамной крепи.

Следует также обратить внимание на неоднородность геомеханических систем, моделирующих условия поддержания горных выработок в зоне влияния очистных работ с помощью различного рода охранных конструкций. Например, исследования [75-77] устойчивости охранных конструкций апробированными методами теории предельного равновесия с построением сетки линий скольжения убедительно показывают существенное влияние геометрических параметров и механических характеристик охранных конструкций на формирование НДС и эпюры нагрузки на крепь горных выработок.

В тоже время аналитическое описание состояния системы «крепь-горная выработка» при наличии охранной конструкции весьма сложно из-за значительных математических трудностей в адекватном отражении геометрических параметров и условий силового взаимодействия всех элементов системы.

В целом можно сделать следующий вывод – несмотря на многообразие

подходов в поиске адекватного аналитического решения, способного описывать максимальное число параметров взаимодействия горного массива с крепью выработки, не существует подхода, позволяющего комплексно в пределах единой системы уравнений, описать состояние системы «крепь-горный массив» для условий, максимально приближенных к реальным. Большинство методик расчетов основываются на плоской постановке задачи с выбором ограниченного числа учитываемых геометрических и физико-механических факторов. Каждый подход имеет узконаправленную специфическую область применения, что не всегда позволяет использовать данную методику при поиске решений в других геомеханических условиях.

Таким образом, современный подход в развитии аналитических решений сводится к поиску моделей математического описания сложных геомеханических процессов, позволяющих получить обобщенные решения для различных условий в классической постановке.

Поэтому необходимо рассмотреть следующую группу решений геомеханических задач, которые основываются на численных методах конечно-разностных схем. Наиболее распространенным и интенсивно развивающимся подобным численным методом является метод конечных элементов, анализ совершенствования методологии применения которого в горном деле изложен в следующих разделах.

1.2. НЕКОТОРЫЕ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДДЕРЖАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА ШАХТАХ ЗАПАДНОГО ДОНБАССА

Эффективное ресурсосбережение при подержании горных выработок предусматривает, как правило, тесную взаимосвязь двух направлений:

- управление горным давлением посредством регулирования деформационно-силовой характеристикой крепежных и охранных конструкций;
- упрочнение приконтурных пород в окрестности выработки с целью их вовлечения в работу по противодействию проявлениям горного давления.

Данная совокупность направлений предопределила комплекс исследований чрезвычайно неоднородных (по геометрическим, механическим и силовым параметрам) пространственных геомеханических систем, при сооружении которых активную роль играют анкерные крепи и твердеющие составы с регулируемыми физико-механическими характеристиками. Несмотря на опрделенную схематизацию и идеализацию реальных геомеханических систем крепления и охраны горных выработок ряд полученных решений имеет не только научную, но и практическую ценность.

Автором [62] получено решение актуальной научно-технической задачи повышения эффективности работы трубчатой анкерной крепи ТА1 на основе разработки метода расчета ее параметров, совершенствования конструкции и

технологии установки. Аналитические исследования процессов силового взаимодействия трубчатой анкерной крепи с породным массивом позволили:

- разработать математическую модель, описывающую динамику деформирования трубчатых анкеров ТА1 и вмещающего породного массива энергией взрыва, которая учитывает прочностные и деформационные свойства системы «трубчатый анкер ТА1-порода», тип и свойства заполнителя при монтаже трубной заготовки, и параметры предлагаемого заряда взрывчатого вещества (ВВ);

- определить напряженно-деформированное состояние системы «трубчатый анкер ТА1-порода»; при этом установлено, что в зависимости от соотношений деформационных и прочностных параметров системы существуют три режима взаимодействия анкера с породными стенками шпура и два типа напряженного состояния материала штанги в опасном сечении;

- предложить критерий оптимизации геометрических параметров системы «трубчатый анкер ТА1-порода», устанавливающий взаимосвязь между поперечными размерами шпура и анкера и деформационными свойствами его материала.

Экспериментальные исследования взаимодействия системы «трубчатый анкер ТА1-порода» подтвердили, что:

- разработанная конструкция заряда ВВ позволяет повысить эффективность развальцовки трубчатого анкера ТА1 в 1,5-2 раза;

- рациональные соотношения прочностных, деформационных и геометрических параметров элементов системы «трубчатый анкер ТА1-порода», обеспечивающие текущее соотношение факторов прочности закрепления анкера в шпуре и прочности на разрыв его материала, обуславливают эффективное упрочнение породного массива;

- трубчатый анкер ТА1 имеет значительную податливость без потери несущей способности в отличие от железобетонных, сталеполимерных и других анкеров, закрепляемых по всей длине шпура. При этом анкер работает в режиме постоянного сопротивления с регулируемой величиной податливости, что позволяет успешно его использовать в подготовительных и очистных выработках.

В результате автором [62] разработаны инженерные рекомендации и новые технические решения:

- инженерный метод расчета основных параметров трубчатого анкера ТА1 и массы заряда ВВ;

- конструкция снаряженной ВВ заготовки трубчатого анкера ТА1, которая испытана на безопасность применения в шахтах, опасных по газу и пыли;

- апробированная и внедренная в шахтных условиях технология взрывного способа изготовления и установки трубчатых анкеров;

- крепь сопряжения выемочных штреков, включающая трубчатые анкера и рамную крепь, соединенные шарнирно-податливыми связями, которая имеет повышенную несущую способность за счет перераспределения усилий пропорционально несущей способности составляющих ее элементов;

– насадка к прибору для контроля трубчатой анкерной крепи, позволяющая более достоверно определять несущую способность трубчатого анкера.

Опытно-промышленные испытания и внедрение трубчатых анкеров ТА1 показали высокую их эффективность при упрочнении сопряжений выемочных штреков с лавами в сравнении с широко применяемыми конструкциями железобетонных и сталеполлимерных анкеров: несущая способность повышается в 1,5-2 раза, металлоемкость снижается до 35%, а трудоемкость изготовления и установки на 40-60%.

Решение научно-технической задачи о разработке и внедрении новых маломатериалоемких конструкций анкерных и комбинированных крепей горных выработок и методов расчета их рациональных параметров, обеспечивающих повышение устойчивости подземных выработок за счет более полного использования несущей способности приконтурного породного массива, выполнено в [65, 66] с получением следующих основных научных и практических результатов:

1. Создан метод расчета многослойных крепей с анкерами, учитывающий неравномерный характер распределения нагрузки как в поперечном, так и продольном сечениях выработок. Исследования показали существенное влияние воздействия усилий натяжения анкеров на изменение поля напряжений в крепи и выявили достаточную эффективность управления напряженным состоянием материала крепи с помощью анкеров в направлении повышения ее несущей способности.

2. На базе разработанного метода получены уравнения, позволяющие определять рациональные параметры установки анкеров в зависимости от горно-геологических условий сооружения выработки, геометрических и механических параметров многослойной крепи.

3. Разработан метод расчета рациональных параметров анкера с эластичным замком. Анализ напряженно-деформированного состояния эластичного замка позволил сделать вывод о целесообразности применения легкодеформирующихся материалов для его изготовления. На базе данных исследований подобрана рациональная рецептура состава резиновой смеси на основе серийной резины марки 7-326.

4. Разработана конструкция анкера с распорным резиновым замком, который выгодно отличается от других конструкций возможностью работы в режиме практически постоянного сопротивления с большой величиной податливости.

5. Разработана конструкция многослойной податливой набрызг-бетонной крепи с анкерами, работающей в режиме постоянного сопротивления, и метод расчета ее рациональных параметров.

Теоретическое обобщение и решение проблемы создания системного подхода к разработке и расчету крепи горных выработок на основе разработки методов управления режимами взаимодействия элементов системы «массив-крепь», обеспечивающих необходимую устойчивость подземных выработок, получено в [71-72]. Основные научные и практические результа-

ты работы заключаются в следующем:

1. Разработана методология подхода к созданию и выбору рациональных параметров крепей горных выработок на основе увязки в единой системе деформационно-силовых характеристик массива и крепи через группу критериев оптимизации параметров их состояния.

2. Создан комбинированный метод прогноза проявлений горного давления, сочетающий решение контактной задачи о взаимодействии породного массива с крепью горной выработки и исследование устойчивости предельного состояния приконтурного массива, отличающийся от известных методов тем, что его вторая часть основана на теории устойчивости породных обнажений, лишена гипотетических предпосылок о форме зоны обрушения в приконтурном массиве и учитывает неосесимметричный характер распределения реакции крепи по ее периметру.

3. Предложены критерии оптимизации режимов взаимодействия системы «массив-крепь»: критерий формирования минимальной нагрузки на крепь предполагает рассмотрение процесса взаимодействия элементов системы в трехмерной постановке, где третьим измерением является периметр крепи горной выработки: критерий равнопрочности крепи формулирует методологию снижения интенсивности поля напряжений в ее материале с помощью управляющих элементов.

4. Исследование устойчивости предельного состояния породного массива в окрестности горной выработки позволило получить на основе методов корреляционно-дисперсионного анализа уравнения связи размеров зоны обрушения и нагрузки на крепь от веса пород этой зоны с функцией распределения реакции крепи по контуру выработки. Эти зависимости совместно с критерием формирования минимальной нагрузки на крепь позволяют выполнить оптимизацию режимов взаимодействия системы «массив-крепь» в замкнутом виде. При этом установлено, что вид функции распределения минимальной нагрузки на крепь по ее периметру отличается достаточным постоянством и в малой степени зависит от используемого в комбинированном подходе решения контактной задачи и характеризуется следующими параметрами: отношение нагрузки в боках и почве выработки по отношению к нагрузке в кровле составляет 0,40-0,45 и 0,15-0,20 соответственно.

5. На базе модели расчета напряженно-деформированного состояния монолитной многослойной крепи с анизотропией механических характеристик в плоскости ее поперечного сечения и критерия равнопрочности крепи разработан метод определения рациональных функций распределения механических характеристик материалов слоев крепи по ее контуру, позволяющий непосредственно выбирать оптимальные составы твердеющих смесей для возведения монолитных крепей в конкретных горно-геологических условиях.

6. Разработан общий для основных конструкций безрамковых анкеров механизм взаимодействия с породными стенками шпура как в период их установки, так и в процессе дальнейшей работы по упрочнению породного массива в окрестности выработки. Модель расчета напряженно-деформированного

состояния системы «беззамковый анкер-порода» позволила установить связь поля напряжений в системе с ее геометрическими и механическими параметрами. При этом показано, что нарушение контакта анкера с породными стенками шпура может быть вызвано действием как касательных напряжений по поверхности контакта, так и осевых растягивающих напряжений в породных стенках шпура, что не учитывалось ранее из-за отсутствия трехмерной постановки задачи. Анализ результатов аналитических и экспериментальных исследований позволил разработать метод расчета основных параметров беззамковой анкерной крепи.

7. Оценены условия применения анкера совместно с рамной крепью и выявлена область рационального использования рамно-анкерной крепи в капитальных и подготовительных выработках. На основе исследования работы рамно-анкерной крепи при различных видах нагружения с использованием критерия равнопрочности крепи даны рекомендации по определению рациональных параметров установки анкеров (координаты установки и величина реакции воздействия на раму) для наиболее широко применяемых в Донбассе типоразмеров рамной крепи.

8. На основе корреляционно-дисперсионного анализа результатов исследований механических свойств свойств уравнения связи механических характеристик отвердевшей смеси на основе фосфогипсового вяжущего с параметрами ее состава, что позволяет оперативно определять требуемую дозировку компонент твердеющей смеси.

9. Разработаны новые конструкции рамных, рамно-анкерных и монолитных крепей, обеспечивающих повышение устойчивости горных выработок в сложных горно-геологических условиях. Это достигается за счет введения в конструкции крепей управляющих элементов (анкера, опорные плиты со стопорными стенками, шарнирно-податливые узлы, деформационно-осадочные швы и т.п.), позволяющих управлять режимом работы крепи в соответствии с характером проявления горного давления.

10. Разработаны новые конструкции средств механизации процессов возведения крепей и охранных элементов горных выработок из твердеющих смесей, позволяющие добиваться повышения прочностных свойств материала отвердевшей смеси и увеличения, тем самым, несущей способности возводимых сооружений.

В работах [73, 74] научно обоснованы технические разработки по совершенствованию технологии тампонажа закрепного пространства горных выработок, обеспечивающей повышение их устойчивости в сложных горно-геологических условиях при одновременно снижении материальных затрат путем управления напряженно-деформационным состоянием образованной крепи в направлении достижения равнопрочности всех ее несущих элементов.

Основные практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Обоснована и доведена до промышленного внедрения конструктивно-технологическая схема тампонажа закрепного пространства горной выработки, основанная на возведении тампонажной оболочки переменной де-

формативности по контуру крепи, что позволяет обеспечить равнопрочность всех основных грузонесущих ее элементов.

2. Анализ напряженно-деформированного состояния трехслойной крепи (образованной при тампонаже закрепного пространства) с переменной по контуру деформативностью выявил существенную зависимость поля напряжений во всех слоях крепи от функции распределения модуля деформации $E_{II}(\theta)$ тампонажного слоя. Получены корреляционные зависимости для расчета максимумов тангенциальных напряжений как определяющих при прочностном расчете слоев и крепи в целом.

3. Изменяя величину и характер распределения модуля деформации тампонажного слоя можно добиться равнопрочности трехслойной крепи, при которой она достигает своей максимальной несущей способности. На основе усовершенствованного критерия равнопрочности трехслойной крепи получены зависимости по расчету рациональной функции распределения модуля деформации тампонажного слоя по контуру крепи.

4. Установлено, что при параметрах упрочненного породного слоя $\delta_{II}\sigma_{сж} > 35...40$ МН/м преобладающая часть внешней нагрузки воспринимается этим слоем крепи; поэтому в данных условиях целесообразно устанавливать облегченную рамную крепь, необходимую, главным образом, для выполнения технологических функций процесса тампонажных работ и использования в качестве ограждающей крепи, что существенно снижает ее материалоемкость (здесь δ_{II} и $\sigma_{сж}$ – толщина и предел прочности на сжатие упрочненного породного слоя).

5. Разработан оперативный графический метод расчета несущей способности равнопрочной трехслойной крепи, а также рекомендации по выбору рационального состава тампонажного раствора в своде и боках крепи в зависимости от прочностных и деформационных свойств пород вокруг выработки, ее геометрических параметров и неравномерности нагружения крепи.

6. Обоснована рациональная величина давления нагнетания тампонажного раствора в пределах $0,2...0,3$ МПа при наиболее широко используемом шаге установки рамной крепи $L = 0,7...0,8$ м.

7. Установлен характер влияния величины отставания тампонажных работ от проходческого забоя на величину и характер проявлений горного давления и глубину упрочнения приконтурных пород; при этом рациональное расстояние отставания места производства тампонажных работ от проходческих колеблется в пределах $30...33$ м.

8. Разработана инженерная методика выбора рациональных параметров тампонажа закрепного пространства горных выработок, обеспечивающих в конкретных горно-геологических условиях достижение максимальной несущей способности трехслойной крепи за счет подбора требуемого состава тампонажного раствора, переменного по контуру выработки.

Решение проблемы интенсификации процессов упрочнения приконтурного породного массива для реализации ресурсосберегающей технологии по-

вышения устойчивости подземных горных выработок выполнялось в [67, 68, 70] на базе пространственного подхода к оптимизации режимов взаимодействия триединой системы: вмещающего выработку породного массива, упрочненных приконтурных пород и крепи. При этом получены следующие научные и практические результаты:

1. Современные ресурсосберегающие технологии повышения устойчивости горных выработок предполагают упрочнение приконтурного породного массива в основном анкерами и твердеющими смесями с образованием грузонесущей конструкции, включающей различные типы поддерживающей крепи. Особенностью такой возводимой конструкции является неоднородность не только в поперечном, но и продольном сечениях выработки ее геометрических, механических и силовых параметров, что предопределило:

– обязательное рассмотрение грузонесущей конструкции в пространственной постановке;

– произвольную пространственную изменчивость реакции подсистемы «упрочненные породы-крепь».

2. Выявлено влияние пространственных колебаний реакции подсистемы «упрочненные породы-крепь» на устойчивость пород внутри зоны предельного равновесия, что обусловило пространственную постановку при разработке метода прогноза проявлений горного давления, который позволил:

– установить связь размеров зоны обрушения пород вокруг выработки с эпюрой реакции подсистемы «упрочненные породы-крепь»;

– определить зависимость пространственной эпюры нагрузки от веса пород зоны обрушения с пространственной эпюрой реакции подсистемы;

– установить область соотношения параметров системы «массив-упрочненные породы-крепь», когда целесообразно регулировать размеры зоны обрушения пород с помощью реакции подсистемы;

– определить область соотношения параметров системы, при которых необходимо учитывать колебания вдоль выработки реакции и нагрузки на подсистему «упрочненные породы-крепь».

3. Разработан пространственный подход к оптимизации режимов взаимодействия системы «массив-упрочненные породы-крепь», основанный на:

– сформулированных в четырехпараметрической постановке критериях оптимизации двух факторов формирования нагрузки на подсистему «упрочненные породы-крепь»: разуплотнение и увеличение в объеме вмещающего выработку породного массива и обрушение пород внутри зоны предельного равновесия;

– созданных в четырехпараметрической постановке критериях выбора рациональной деформационно-силовой характеристики подсистемы «упрочненные породы-крепь»;

– аналитически установленном факте колебаний в «противофазе» нагрузки на подсистему «упрочненные породы-крепь» и ее реакции, что негативно влияет на устойчивость выработки, так как в сечении с минимальной реакцией подсистемы на нее действует максимальная нагрузка. Для ней-

трализации этого факта разработаны в пространственной постановке функции цели оптимизации режимов взаимодействия системы «массив-упрочненные породы-крепь».

4. На базе фундаментальных положений механики твердого деформируемого тела с использованием математического аппарата теории возмущений разработан обобщенный метод расчета напряженно-деформированного состояния подсистемы «упрочненные породы-крепь» с произвольным распределением ее геометрических, механических и силовых параметров в пространственной постановке, что позволило:

- описать особенности практически всех современных типов крепей, в том числе, работающих с упрочнением приконтурных пород анкерами и твердеющими смесями;

- доказать, что переменные геометрические, механические и силовые параметры подсистемы должны использоваться в качестве инструмента для управления ее напряженно-деформированным состоянием;

- сформулировать группу критериев достижения равнопрочности подсистемы «упрочненные породы-крепь», позволяющих повысить ее несущую способность без увеличения материалоемкости.

5. Создана комплексная пятиэтапная схема оптимизации взаимодействия системы «массив-упрочненные породы-крепь», реализующая одновременно условия адаптации грузонесущей конструкции «упрочненные породы-крепь» к характеру проявлений горного давления и условия равнопрочности самой конструкции в пространственной постановке, что явилось методологической основой для:

- создания метода расчета рациональных параметров упрочнения приконтурных пород анкерной крепью, учитывающего пространственные колебания нагрузки со стороны породного массива;

- определения области возможного приведения в полное соответствие (полная адаптация) эпюры нагрузки на упрочненный анкерами приконтурный породный слой и эпюры его реакции в зависимости от геомеханических условий сооружения выработки;

- установления области возможного применения анкеров как самостоятельного вида крепи горных выработок, то есть условий, когда преобразование напряженно-деформированного состояния приконтурных пород с помощью реакции системы анкеров создает грузонесущую конструкцию, способную выдерживать прогнозируемую нагрузку;

- разработки метода расчета рациональных параметров рамно-анкерной крепи, обеспечивающих ее равнопрочность, с одной стороны, и максимально возможную пространственную адаптацию к характеру проявлений горного давления с другой стороны;

- выработки практических рекомендаций по регулированию параметров анкерной и рамно-анкерной крепей в соответствии с расчетными рациональными значениями;

- создания аналитико-экспериментального метода расчета рациональ-

ных конструктивно-технологических параметров комбинированной крепи, образованной при тампонаже закрепного пространства горных выработок, учитывающего реальную трехмерную эпюру колебаний глубины проникновения тампонажного раствора, определенную в шахтных условиях;

– установления области достижения равнопрочности данной комбинированной крепи в зависимости от соотношений геометрических и механических параметров ее элементов, а также эпюры смещений породного контура выработки.

Выбору рациональных параметров технологической схемы крепления и охраны выемочных штреков искусственными полосами переменной жесткости, обеспечивающей эффективное ресурсосбережение при бурошнековой выемке тонких и весьма тонких угольных пластов, а также сокращение потерь угля за счет его извлечения из ранее оставленных охранных целиков, посвящена работа [75, 76], научные и практические результаты которой состоят в следующем.

1. Обоснована целесообразность применения способа охраны повторно используемых выемочных штреков искусственными полосами переменной жесткости для технологии бурошнековой выемки тонких и весьма тонких угольных пластов.

2. Разработан и обоснован принцип выбора рациональных параметров конструктивно-технологической схемы крепления и охраны выемочных штреков, основанной на рассмотрении ее отдельных элементов как единой взаимовлияющей системы, в которой геометрические и механические параметры охранной полосы переменной жесткости являются инструментом для формирования благоприятной (с точки зрения устойчивости выработки) эпюры нагрузки на крепь.

3. Установлено, что арочная податливая крепь с циркульным сводом имеет максимальную несущую способность при соотношении вертикальной и боковой нагрузок в диапазоне $\beta = 2...3$, который практически постоянен для большинства типовых сечений выработок.

4. Исследование деформирования податливой части охранной полосы с учетом поэтапного скола призм скольжения и сопутствующего перераспределения нагрузки от веса пород зоны обрушения показали, что достижение рационального соотношения β нагрузок на крепь обеспечивается относитель-

ной шириной податливой части полосы в интервале $\frac{L_{II}}{m} = 0,5...0,9$ при угле

внутреннего трения ее материала $\psi_{II} \leq 30^\circ$ (здесь m – мощность пласта).

5. Регулирование угла внутреннего трения ψ_{II} податливой части охранной полосы обеспечивается вводом требуемого количества поризатора в песчано-цементную твердеющую смесь, связывающую бутовый камень. Полученная зависимость рецептуры твердеющей смеси и угла внутреннего трения ψ_{II} отвердевшего камня указывает на возможность его изменения в

интервале $\psi_{II} = 10^\circ \dots 30^\circ$ при введении поризатора в количестве 1...4% от объема портландцемента марки М400 при песчано-цементном отношении $\frac{\Pi}{Ц} = \frac{3}{1}$ и водоцементном – $\frac{B}{Ц} = 0,4$.

6. Разработанный метод оценки размеров зоны разгруженных пород вокруг выработки при ее охране полосами переменной жесткости и эпюры нагрузки, формирующейся весом неустойчивых пород, указывает на реальную возможность безремонтного поддержания выработки при бурошнековой выемке рамной податливой крепью из спецпрофиля СВП-22...33 со стандартным шагом установки $l_p = 0,5 \dots 1,2$ м.

7. Расчет жесткой (опорной) части охранной полосы на прочность показывает, что для типовых сечений выработок при расчетной ширине податливой части полосы на глубинах разработки $H = 300 \dots 600$ м рациональная относительная ширина жесткой части колеблется в интервале $\frac{L_{жс}}{m} = 1 \dots 1,5$ при использовании песчано-цементной твердеющей смеси состава $\frac{\Pi}{Ц} = \frac{3}{1}$ и

$$\frac{B}{Ц} = 0,4.$$

Доведены до практического использования сформулированные критерии увязки деформационных параметров крепи и охранных полос переменной жесткости.

Обоснование задачи повышения эффективности упрочнения слабых приконтурных пород подземных горных выработок трубчатой анкерной крепью ТА2 [63, 64] получены на базе закономерностей регулирования напряженно-деформированного состояния системы «трубчатый анкер ТА2-породные стенки шпура», которое обеспечивает податливый режим работы системы со стабильной максимально возможной реакцией сопротивления горному давлению. Аналитические и экспериментальные исследования позволили получить следующие результаты.

1. Установлено, что в слабых горных породах, характеризующихся интенсивным развитием смещений породного контура выработки (500...1000 мм и более) и нагрузки на ее крепь (до 300...500 кПа), анкера должны обладать постоянно высокой реакцией сопротивления до 150...250 кН на протяжении всего периода их податливости порядка 200...500 мм, иногда более. Таким требованиям в наибольшей степени отвечают конструкции трубчатых анкеров, деформационно-силовая характеристика которых близка к режиму постоянного сопротивления при значительных потенциальных возможностях упрочненного взрывом материала анкера.

2. При упрочнении слабых горных пород установлено несоответствие высокой прочности на разрыв существующих конструкций трубчатых анкеров и

прочности их закрепления в шпуре, что обусловлено эффектом поперечного сужения анкера под осевой нагрузкой и ослабления контакта с породными стенками шпура. Для нейтрализации данного негативного эффекта обоснован метод управления процессом взаимодействия системы «трубчатый анкер ТА2-породные стенки шпура» с помощью регулируемых механических характеристик материала заполнителя внутренней полости анкера, который построен на базе комплекса аналитических и экспериментальных лабораторных и шахтных исследований.

3. Разработана методика расчета напряженно-деформированного состояния системы «трубчатый анкер ТА2-породные стенки шпура», учитывающая наличие заполнителя и его воздействие на поле напряжений в системе.

4. В соответствии с комплексом критериев оптимизации поля напряжений в системе «трубчатый анкер ТА2-породные стенки шпура» создана аналитическая методика расчета рациональных параметров системы, обеспечивающая максимально возможную реакцию сопротивления трубчатого анкера ТА2. Численный анализ расчетных выражений показал, что для слабых горных пород достаточно развития давления на внутреннюю поверхность металлической трубы до 40 МПа, которое может быть реализовано заполнителем на основе песчано-цементного раствора с добавкой расширяющегося портландцемента (РПЦ).

5. Лабораторными испытаниями механических характеристик песчано-цементного камня, полученного на основе наиболее широко применяемого портландцемента общестроительного назначения марки ПЦ П/Б-Ш-400, установлен диапазон требуемого содержания РПЦ до 30% от общего веса вяжущего, обеспечивающего максимальную реакцию трубчатого анкера ТА2 в слабых породах.

6. Корреляционно-дисперсионный анализ результатов лабораторных испытаний позволил установить связь состава песчано-цементного камня с его механическими характеристиками (коэффициент объемного расширения K_3 , предел прочности на одноосное сжатие $\sigma_3^{сж}$, модуль деформации E_3 и коэффициент Пуассона μ_3) во времени t твердения. Весьма интенсивный рост параметров K_3 , $\sigma_3^{сж}$ и E_3 в первые сутки твердения обеспечивает активную работу анкера ТА2 сразу после его установки. Соотношение функций $K_3(t)$, $\sigma_3^{сж}(t)$ и $\mu_3(t)$ таково, что обеспечивается целостность заполнителя на протяжении всего периода t его твердения. На основе выявленных закономерностей разработана методика выбора рациональных составов твердеющей смеси заполнителя анкера ТА2.

7. Шахтные исследования деформационно-силовой характеристики трубчатого анкера ТА2 показали ее адекватность наиболее эффективному в слабых породах режиму постоянного сопротивления с колебаниями реакции $\pm(5...7)\%$ в процессе податливости. Подтверждена целесообразность при-

менения заполнителя в конструкции анкера ТА2: его реакция сопротивления в слабых породах возросла в 2...3 раза (иногда более) по сравнению с аналогичными размерами анкера ТА1 (без заполнителя). Установлено удовлетворительное для практики соответствие (как правило, не более 10%) экспериментальных и расчетных значений реакции анкера ТА2, что учтено в инженерной методике поправочным коэффициентом.

Подытоживая выполненный анализ следует отметить, что попытка описания геомеханических систем, имеющих существенную неоднородность геометрических и механических параметров ее элементов, приводит к чрезвычайной громоздкости конечных уравнений (как правило, в виде рядов с достаточно большим количеством удерживаемых членов) и необходимости численных методов их решения, а для получения зависимостей в замкнутом виде приходится прибегать к корреляционно-дисперсному анализу обширного массива дискретных расчетов.

Поэтому, с развитием вычислительной техники все более перспективными представляются численные методы исследования геомеханических систем (методы конечных, граничных, дискретных элементов и т.п.) со сложной пространственной геометрией и существенной механической неоднородностью входящих элементов.

2. АНАЛИЗ И ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ОСНОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАДАЧАХ ГЕОМЕХАНИКИ

2.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЗАДАЧ ГЕОМЕХАНИКИ В УПРУГОЙ ПОСТАНОВКЕ

Рассмотрим пространственную область, представляющую собой упругое тело, в правой прямоугольной системе координат $Ox_1x_2x_3$ [77]. Расчленим область расчетной схемы на конечные элементы, каждый из которых в общем случае представляет собой многогранник, ограниченный криволинейными поверхностями (рис. 2.1).

Таким образом, получаем некоторую композицию из N_8 конечных элементов, соединенных в N_p точках, называемых узлами. Пронумеруем последовательно узлы и конечные элементы расчетной области.

Свяжем с p -м конечным элементом локальную систему координат $O'\xi_1\xi_2\xi_3$. Со стороны смежных конечных элементов на p -й реакции

$N_{1\xi}^p, N_{2\xi}^p, \dots, N_{m\xi}^p$ положительные направления компонент которых совпадают с положительными направлениями локальных осей $O'\xi_k$ ($k = 1, 2, 3$).

Обозначим $U_{1\xi}^p, U_{2\xi}^p, \dots, U_{m\xi}^p$ векторы обобщенных перемещений узлов p -го конечного элемента, предположив, что положительные направления компонент этих векторов совпадают с положительными направлениями локальных осей $O'\xi_k$ ($k = 1, 2, 3$).

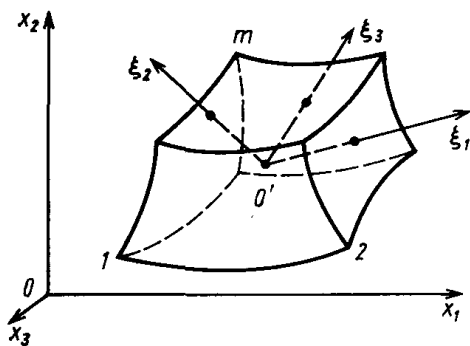


Рис. 2.1. Общий вид конечного элемента

Вследствие линейности задачи можно установить однозначную зависимость между обобщенными реакциями $N_{1\xi}^p, N_{2\xi}^p, \dots, N_{m\xi}^p$ и перемещениями $U_{1\xi}^p, U_{2\xi}^p, \dots, U_{m\xi}^p$ узлов p -го конечного элемента. В общем случае эта зависимость имеет вид

$$N_{\xi}^p = [R_{\xi}^p] U_{\xi}^p + Q_{\xi}^p. \quad (2.1)$$

Здесь

$$N_{\xi}^p = \begin{Bmatrix} N_{1\xi}^p \\ N_{2\xi}^p \\ \dots \\ N_{m\xi}^p \end{Bmatrix}; \quad U_{\xi}^p = \begin{Bmatrix} U_{1\xi}^p \\ U_{2\xi}^p \\ \dots \\ U_{m\xi}^p \end{Bmatrix}; \quad Q_{\xi}^p = \begin{Bmatrix} Q_{1\xi}^p \\ Q_{2\xi}^p \\ \dots \\ Q_{m\xi}^p \end{Bmatrix}; \quad (2.2)$$

$$[R_{\xi}^p] = \begin{bmatrix} r_{11\xi}^p & r_{12\xi}^p & \dots & r_{1m\xi}^p \\ r_{21\xi}^p & r_{22\xi}^p & \dots & r_{2m\xi}^p \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1\xi}^p & r_{m12\xi}^p & \dots & r_{mm\xi}^p \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

где Q_{ξ}^p и $[R_{\xi}^p]$ – вектор и матрица реакций p -го конечного элемента в локальной системе координат $O'\xi_1\xi_2\xi_3$.

Столбцы матрицы $[R_{\xi}^p]$ представляют собой обобщенные усилия в узлах конечного элемента, обусловленные единичными обобщенными перемещениями этих узлов при отсутствии внешних нагрузок на конечный элемент. Согласно (2.1) Q_{ξ}^p – векторы узловых обобщенных усилий, обусловленных поверхностными и массовыми механическими нагрузками, действующими на p -й конечный элемент, при нулевых обобщенных перемещениях этого элемента [77, 78].

Предположим, что перемещения в любой точке элемента определяет вектор:

$$u(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = [F(\xi_1, \xi_2, \xi_3)] U_{\xi}, \quad (2.4)$$

где

$$[F(\xi_1, \xi_2, \xi_3)] = [F_{1\xi} \quad F_{2\xi} \quad \dots \quad F_{m\xi}]. \quad (2.5)$$

Матрицы $[F_{i\xi}(\xi_1, \xi_2, \xi_3)]$, размерность которых совпадает с размерностью вектора $U_{i\xi}$, являются функциями координат; вектор U_{ξ} есть вектор обобщенных узловых перемещений рассматриваемого конечного элемента.

Функции $[F_{1\xi}]$, $[F_{2\xi}]$, ..., $[F_{m\xi}]$ должны быть выбраны так, чтобы при подстановке координат i -го узла в соотношение (2.4) компоненты вектора $u(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ принимали значения компонент вектора $U_{i\xi}$ обобщенных пере-

мещений i -го узла рассматриваемого конечного элемента ($i=1, 2, \dots, m$).

Предположим, что функции $F_{i\xi}(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ ($i=1, 2, \dots, m$) известны, т.е. известна зависимость (2.4) для каждого конечного элемента [78].

Обобщенные деформации $\varepsilon(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ в любой точке конечного элемента всегда связаны с обобщенными перемещениями этой точки дифференциальной зависимостью

$$\varepsilon(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = [L] \cdot u(\xi_1, \xi_2, \xi_3), \quad (2.6)$$

где $[L]$ – дифференциальная матрица, определяемая для каждой конкретной задачи согласно теории упругости.

Подставив соотношение (2.4) в зависимость (2.6), получаем

$$\varepsilon(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = [B(\xi_1, \xi_2, \xi_3)] U_\xi, \quad (2.7)$$

где

$$[B(\xi_1, \xi_2, \xi_3)] = [L] \cdot [F(\xi_1, \xi_2, \xi_3)]. \quad (2.8)$$

Соотношение (2.7) связывает обобщенные деформации в любой точке конечного элемента с узловыми обобщенными перемещениями этого элемента. Так как функции $[F_{i\xi}(\xi_1, \xi_2, \xi_3)]$ ($i=1, 2, \dots, m$) считаем известными, то с учетом соотношения (1.8) можно определить матрицу $[B(\xi_1, \xi_2, \xi_3)]$ простым дифференцированием.

Для упругого материала обобщенные напряжения связаны с обобщенными деформациями соотношением

$$\sigma(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = [D] \cdot \{\varepsilon(\xi_1, \xi_2, \xi_3) - \varepsilon_t\}, \quad (2.9)$$

где $[D]$ – алгебраическая матрица (матрица упругости), определяемая для каждой конкретной задачи согласно теории упругости; ε_t – начальная деформация. Подставив (2.7) в (2.9), получаем соотношение

$$\sigma(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = [D][B(\xi_1, \xi_2, \xi_3)] U_\xi - [D]\varepsilon_t, \quad (2.10)$$

связывающее обобщенные напряжения в любой точке рассматриваемого конечного элемента с обобщенными узловыми перемещениями этого элемента.

Потенциальная энергия деформации конечного элемента [79]

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \varepsilon^T \sigma dV, \quad (2.11)$$

где V – объем конечного элемента.

Подставив соотношения (2.7) и (2.10) в формулу (2.11) и учитывая, что

$$\varepsilon^T = U_\xi^T [B]^T \quad (2.12)$$

получим

$$\Pi = \frac{1}{2} U_\xi^T \left(\int_V [B]^T [D] [B] dV \right) U_\xi - \frac{1}{2} U_\xi^T \int_V [B]^T [D] \varepsilon_i dV. \quad (2.13)$$

Предположим, на конечный элемент действуют обобщенные поверхностные $q_\xi(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ и объемные $p_\xi(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ нагрузки, положительные направления компонент которых совпадают с положительными направлениями локальных осей $O' \xi_k$ ($k = 1, 2, 3$). Тогда работа внешних сил, сил инерции и реакций, приложенных к узлам рассматриваемого конечного элемента:

$$P = \frac{1}{2} U_\xi^T N_\xi + \frac{1}{2} \int_V u_\xi^T \left(p_\xi - \rho \frac{\partial^2 u_\xi}{\partial \tau^2} \right) dV, \quad (2.14)$$

где A – площадь поверхности, конечного элемента; ρ – плотность материала; τ – время.

Подставив соотношения (2.1) и (2.4) в (2.14), получаем

$$P = \frac{1}{2} U_\xi^T \left\{ \begin{array}{l} [R_\xi] U_\xi + Q_\xi - \int_V [B]^T [D] \varepsilon_i dV - \\ - \int_V [F]^T \rho [F] \frac{\partial^2 u_\xi}{\partial \tau^2} dV + \int_V [F]^T p_\xi dV \end{array} \right\}. \quad (2.15)$$

Приравняв работу внешних нагрузок и реакций (2.15) потенциальной энергии деформации (2.13), находим матрицу реакций

$$[R_\xi] = \int_V [B]^T [D] [B] dV; \quad (2.16)$$

матрицу масс

$$[m_\xi] = \rho \int_V [F]^T [F] dV \quad (2.17)$$

и вектор

$$Q_\xi = Q_{p\xi} + Q_{q\xi}, \quad (2.18)$$

где $Q_{p\xi}$ – вектор, обусловленный действием массовых нагрузок:

$$Q_{p\xi} = - \int_V [F]^T p_\xi dV; \quad (2.19)$$

$Q_{q\xi}$ – вектор, обусловленный действием поверхностных нагрузок

$$Q_{q\xi} = - \int_V [F]^T q_\xi dV. \quad (2.20)$$

Матрицы $[B]$ и $[F]$ в общем случае являются функциями координат ξ_1 , ξ_2 и ξ_3 . Интегрирование выражений (2.16), (2.17), (2.19) и (2.20) позволяет вычислить определяющие матрицы и векторы для конечных элементов.

2.2. ОБОБЩЕННАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ С УЧЕТОМ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД

Согласно соотношениям (2.10) и (2.16) для вычисления матрицы реакций R_ξ необходимо знать матрицу упругости $[D]$. Предположим, что рассматриваемая расчетная область имеет свойства ортотропного материала, причем оси ортотропии совпадают с локальными осями ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 конечного элемента [80]. Тогда зависимость между деформациями

$$\varepsilon = [\varepsilon_{11} \quad \varepsilon_{22} \quad \varepsilon_{33} \quad \varepsilon_{12} \quad \varepsilon_{23} \quad \varepsilon_{31}]^T \quad (2.21)$$

и напряжениями

$$\sigma = [\sigma_{11} \quad \sigma_{22} \quad \varepsilon_{33} \quad \tau_{12} \quad \tau_{23} \quad \tau_{31}]^T \quad (2.22)$$

имеет вид

$$\varepsilon = [C]\sigma, \quad (2.23)$$

где

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{13}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_1} & -\frac{\nu_{32}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} \end{bmatrix}. \quad (2.24)$$

Здесь σ_{ij} , τ_{ij} – компоненты тензора напряжений; E_i – модули упругости; ν_{ij} – коэффициенты Пуассона; G_{ij} – модули сдвига.

При этом должны быть выполнены соотношения $E_i \nu_{ji} = E_j \nu_{ij}$.

Из выражения (2.23) следует, что

$$\sigma = [D]\varepsilon, \quad (2.25)$$

где $[D] = [C]^{-1}$ – матрица упругости ортотропного материала.

Предположим, что порода ведет себя как вязкоупругий материал, а его поведение описывается линейными наследственными соотношениями Больцмана-Вольтерра с интегральными разностными ядрами [81], подчиняющимися условию замкнутого цикла. Тогда физические свойства породы могут быть описаны с помощью комплексного модуля

$$\tilde{E} = E_R + iE_I, \quad (2.26)$$

действительная и мнимая составляющие которого определяются формулами

$$E_R = (1 - \Gamma_c)E; \quad E_I = \Gamma_s E, \quad (2.27)$$

где Γ_c и Γ_s – косинус- и синус- преобразования Фурье ядра $R[t]$:

$$\Gamma_c = \int_0^{\infty} R(z) \cos \omega z dz; \quad \Gamma_s = \int_0^{\infty} R(z) \sin \omega z dz. \quad (2.28)$$

Предположим также, что объемная деформация чисто упругая, т. е. модуль объемного сжатия является постоянной величиной:

$$\frac{\tilde{E}}{1 - 2\tilde{\nu}} = \frac{E}{1 - 2\nu}. \quad (2.29)$$

Тогда комплексный коэффициент Пуассона

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{2} - \frac{(1 - 2\nu)\tilde{E}}{2E} \quad (2.30)$$

и комплексный модуль сдвига

$$\tilde{G} = \frac{\tilde{E}}{2(1 + \tilde{\nu})}. \quad (2.31)$$

Таким образом, формально можно считать, что для вязкоупругих тел справедливы физические соотношения линейной теории упругости, в которых упругие константы заменены их комплексными аналогами.

Поведение нелинейно-упругого материала описывается соотношениями теории малых упруго-пластических деформаций Ильюшина [82]. При этом зависимость между интенсивностями напряжений

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6\tau_{12}^2 + 6\tau_{23}^2 + 6\tau_{31}^2} \quad (2.32)$$

и деформаций

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + \frac{3}{2}(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{31}^2)} \quad (2.33)$$

описывается функцией $\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i)$, не зависящей от типа напряженного состояния, поэтому для ее определения используем диаграмму растяжения образцов материала. По этой диаграмме и по формулам, приведенным в работе [82], получаем

$$\sigma_i = \sigma; \quad \varepsilon_i = \varepsilon - \frac{(1-2\nu)\sigma}{3E}. \quad (2.34)$$

При этом секущий и касательный модули

$$E_l = \frac{\sigma_i(\varepsilon_i)}{\varepsilon_i}, \quad E_d = \frac{d\sigma_i(\varepsilon_i)}{d\varepsilon_i}. \quad (2.35)$$

Вводя обозначения $\varepsilon_0 = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$; $\sigma_0 = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3$; $K = E/[3(1-2\nu)]$, согласно теории малых упруго-пластических деформаций [80] получим

$$\sigma_0 = 3K\varepsilon_0; \quad \tau_{12} = \frac{\sigma_i}{3\varepsilon_i} \varepsilon_{12}; \quad \sigma_{11} - \sigma_0 = \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i} (\varepsilon_{11} - \varepsilon_0) \left(\begin{matrix} \rightarrow 2 \rightarrow 3 \\ \leftarrow \leftarrow \leftarrow \end{matrix} \right), \quad (2.36)$$

откуда

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \frac{1}{9K} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{1}{E_l} \left(\sigma_{11} - \frac{\sigma_{22}}{2} - \frac{\sigma_{33}}{2} \right); \\ \varepsilon_{12} &= \frac{3}{E_l} \tau_{12} \left(\begin{matrix} \rightarrow 2 \rightarrow 3 \\ \leftarrow \leftarrow \leftarrow \end{matrix} \right) \end{aligned} \quad (2.37)$$

Линеаризуем эти зависимости с помощью метода Ньютона-Рафсона [83]. Для этого представим выражение (2.23) в виде

$$\varepsilon + \delta\varepsilon = \varepsilon + [C]\delta\sigma, \quad (2.38)$$

где

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varepsilon_{11}}{\partial \sigma_{11}} & \frac{\partial \varepsilon_{11}}{\partial \sigma_{22}} & \dots & \frac{\partial \varepsilon_{11}}{\partial \tau_{31}} \\ \frac{\partial \varepsilon_{22}}{\partial \sigma_{11}} & \frac{\partial \varepsilon_{22}}{\partial \sigma_{22}} & \dots & \frac{\partial \varepsilon_{22}}{\partial \tau_{31}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \varepsilon_{31}}{\partial \sigma_{11}} & \frac{\partial \varepsilon_{31}}{\partial \sigma_{22}} & \dots & \frac{\partial \varepsilon_{31}}{\partial \tau_{31}} \end{bmatrix}.$$

Считая два последующих приближения достаточно близкими, с учетом соотношений $\varepsilon^{(s+1)} = \varepsilon^{(s)} + \delta\varepsilon$; $\sigma^{(s+1)} = \sigma^{(s)} + \delta\sigma$ из (2.38) получим итерационные соотношения [81, 83]

$$\varepsilon^{(s+1)} = \varepsilon^{(s)} + [C^{(s)}] (\sigma^{(s+1)} - \sigma^{(s)}). \quad (2.39)$$

Определим элементы матриц $[C^{(s)}]$, опустив для простоты индекс s , соответствующий номеру итерации. Согласно выражениям (2.37)

$$[C] = \frac{1}{9K} [C_0] + \frac{1}{2E_l} [C_l] + [C_\sigma], \quad (2.40)$$

где

$$[C_0] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad [C_l] = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 \end{bmatrix};$$

$$c_{\sigma_{jk}} = \frac{\partial}{\partial \sigma_k} \left(\frac{1}{E_l} \right) S_j; \quad S_1 = \sigma_{11} - \frac{1}{2} \sigma_{22} - \frac{1}{2} \sigma_{33} \quad (1 \rightarrow 2 \rightarrow 3);$$

$$S_4 = 3\tau_{12}; \quad S_5 = 3\tau_{23}; \quad S_6 = 3\tau_{31}.$$

Учитывая выражение для интенсивности напряжений (2.32) и обозначения (2.22), (2.35), находим

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \sigma_1} \left(\frac{1}{E_l} \right) &= \frac{\partial}{\partial \sigma_{11}} \left(\frac{1}{E_l} \right) = \frac{d}{d\sigma_i} \left(\frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} \right) \frac{\partial \sigma_i}{\partial \sigma_{11}} = \left(\frac{1}{\sigma_i} \frac{d\varepsilon_i}{d\sigma_i} - \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i^2} \right) \times \\ &\times \frac{2\sigma_{11} - \sigma_{22} - \sigma_{33}}{2\sigma_i} = \left(\frac{1}{E_d} - \frac{1}{E_l} \right) \frac{S_1}{\sigma_i^2} \quad (1 \rightarrow 2 \rightarrow 3); \\ \frac{\partial}{\partial \sigma_4} \left(\frac{1}{E_l} \right) &= \frac{\partial}{\partial \tau_{12}} \left(\frac{1}{E_l} \right) = \frac{d}{d\sigma_i} \left(\frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} \right) \frac{\partial \sigma_i}{\partial \tau_{12}} = \left(\frac{1}{\sigma_i} \frac{d\varepsilon_i}{d\sigma_i} - \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i^2} \right) \times \\ &\times \frac{3\tau_{12}}{\sigma_i} = \left(\frac{1}{E_d} - \frac{1}{E_l} \right) \frac{S_4}{\sigma_i^2} \quad (1 \rightarrow 2 \rightarrow 3); \quad (4 \rightarrow 5 \rightarrow 6). \end{aligned} \quad (2.41)$$

Таким образом, элементы матрицы $[C_\sigma]$ в соотношении (2.40) вычисляем по формуле

$$c_{\sigma_{jk}} = \frac{S_j S_k}{\sigma_i^2} \left(\frac{1}{E_d} - \frac{1}{E_l} \right). \quad (2.42)$$

Из соотношений (2.39) следует, что

$$\varepsilon^{(s+1)} = [C^{(s)}] \sigma^{(s+1)} + \varepsilon', \quad (2.43)$$

где $\varepsilon' = \varepsilon^{(s)} - [C^{(s)}] \sigma^{(s)}$.

В нулевом приближении, когда $E_l^{(0)} = E_d^{(0)} = 3E/[2(1+\nu)]$; $\varepsilon^{(0)} = 0$; $\sigma^{(0)} = 0$, элементы матрицы $[C_\sigma]$ в соотношении (2.40) согласно (2.42) тождественно равны нулю, и матрица $C^{(0)}$ переходит в матрицу (2.24) упругости для изотропного материала.

Соотношение, обратное (2.43), имеет вид

$$\sigma^{(s+1)} = [D^{(s)}] \varepsilon^{(s+1)}, \quad (2.44)$$

где $[D^{(s)}] = [C^{(s)}]^{-1}$.

2.3. РЕШЕНИЕ ПЛОСКОЙ ЗАДАЧИ ГЕОМЕХАНИКИ В УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ ПОСТАНОВКЕ

Принципиальный подход к решению плоской задачи геомеханики, изложенный в предыдущем параграфе, позволяет получить решение на основе следующих аналитических соотношений – при плоском напряженном состоянии векторы деформаций (2.21) и напряжений (2.22) имеют вид $\varepsilon = [\varepsilon_{11} \varepsilon_{22} \gamma]^T$; $\sigma = [\sigma_{11} \sigma_{22} \tau]^T$, а интенсивности напряжений (2.32) и деформаций (2.33) определяются соотношениями (2.34). Однако такой подход не учитывает ряд особенностей поведения материала расчетной области.

Предположим, что материал нелинейно-упругий и справедлива теория малых упруго-пластических деформаций [84, 85], вместо основных соотношений (2.37) получаем

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= (\sigma_{11} + \sigma_{22})/(9K) + (\sigma_{11} - \sigma_{22}/2)/E_l \quad (1 \leftrightarrow 2); \\ \varepsilon_{33} &= -\frac{1-\alpha}{1+2\alpha} (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}); \quad \gamma = 2\tau/E_l, \end{aligned} \quad (2.45)$$

где $\alpha = \frac{2E_l}{9K}$.

Линеаризация соотношений (2.45) с помощью метода Ньютона-Рафсона приводит к формуле (2.39), в которой элементы матрицы $[C^{(s)}]$ можно определить последовательным дифференцированием компонент вектора деформаций по компонентам вектора напряжений:

$$c_{ij}^{(s)} = \left(\frac{\partial \varepsilon(i)}{\partial \sigma(i)} \right)^s. \quad (2.46)$$

Опустив для простоты индекс s из (2.46), получим

$$\begin{aligned} c_{11} &= \frac{1}{9K} + \frac{1}{E_l} + \frac{\partial}{\partial \sigma_{11}} \left(\frac{1}{E_l} \right) S_{11} \quad (1 \leftrightarrow 2); \\ c_{12} &= \frac{1}{9K} - \frac{1}{2E_l} + \frac{\partial}{\partial \sigma_{22}} \left(\frac{1}{E_l} \right) S_{11} \quad (1 \leftrightarrow 2); \\ c_{13} &= \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{1}{E_l} \right) S_{11} \quad (1 \leftrightarrow 2); \quad c_{31} = 3\tau \frac{\partial}{\partial \sigma_{11}} \left(\frac{1}{E_l} \right) \quad (1 \leftrightarrow 2); \\ c_{31} &= \frac{3}{E_l} + 3\tau \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{1}{E_l} \right), \end{aligned} \quad (2.47)$$

где $S_{11} = \sigma_{11} - \sigma_{22}/2 \quad (1 \leftrightarrow 2)$.

Учитывая соотношения для секущего и касательного модулей, а также для интенсивности напряжений

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{11}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{22}^2 + 3\tau^2},$$

получаем

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \sigma_{11}} \left(\frac{1}{E_l} \right) &= \frac{\partial}{\partial \sigma_i} \left(\frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} \right) \frac{\partial \sigma_i}{\partial \sigma_{11}} = \frac{2\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2\sigma_i} \left(\frac{1}{\sigma_i} \frac{d\varepsilon_i}{d\sigma_i} - \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i^2} \right) = \\ &= \frac{S_{11}}{\sigma_{11}^2} \left(\frac{1}{E_d} - \frac{1}{E_l} \right) (1 \leftrightarrow 2); \quad \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{1}{E_l} \right) = \frac{\partial}{\partial \sigma_i} \left(\frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} \right) \frac{\partial \sigma_i}{\partial \tau} = \frac{3\tau}{\sigma_i^2} \left(\frac{1}{E_d} - \frac{1}{E_l} \right). \end{aligned} \quad (2.48)$$

Окончательно на s -м приближении согласно методу Ньютона-Рафсона имеем

$$\begin{aligned}
 c_{11} &= \frac{1}{9K} + \frac{1}{E_l} + \frac{S_{11}^2}{\sigma_i^2} \left(\frac{1}{E_d} - \frac{1}{E_l} \right) \quad (1 \leftrightarrow 2); \\
 c_{21} = c_{12} &= \frac{1}{9K} - \frac{1}{2E_l} + \frac{S_{11}S_{22}}{\sigma_i^2} \left(\frac{1}{E_d} - \frac{1}{E_l} \right); \\
 c_{13} = c_{31} &= 3\tau \frac{S_{11}}{\sigma_i^2} \left(\frac{1}{E_d} - \frac{1}{E_l} \right) \quad (1 \leftrightarrow 2); \quad c_{33} = \frac{3}{E_l} + \frac{9\tau^2}{\sigma_i^2} \left(\frac{1}{E_d} - \frac{1}{E_l} \right).
 \end{aligned} \tag{2.49}$$

Для определения элементов матрицы $[C^{(s+1)}]$ на $(s+1)$ -м приближении с помощью метода Ньютона-Рафсона необходимо знать лишь компоненты вектора деформаций $\varepsilon^{(s)}$ из предыдущего приближения и зависимость $\sigma_i(\varepsilon_i)$. Действительно, зная эти компоненты, по итерационным формулам

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \frac{2E_l^{p-1}}{(9K)}; \quad \varepsilon_{33}^p = -\frac{1-\alpha}{1+2\alpha} (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}); \\
 \varepsilon_i^p &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33}^p)^2 + (\varepsilon_{33}^p - \varepsilon_{11})^2} + \frac{3}{2} \gamma^2; \\
 E_l^p &= \frac{\sigma_i(\varepsilon_i^p)}{d\varepsilon_i^p}; \quad E_d^p = \frac{d\sigma_i(\varepsilon_i^p)}{d\varepsilon_i^p}; \\
 \sigma_{11}^p &= 2E_l^p (\varepsilon_{11} - \varepsilon_{33}^p) / 3 \quad (1 \leftrightarrow 2); \quad \tau^p = E_l^p \gamma
 \end{aligned} \tag{2.50}$$

определяем секущий $E_l^{(s)}$ и касательный $E_d^{(s)}$ модули, а также напряжения $\sigma_{11}^{(s)}$, $\sigma_{22}^{(s)}$, $\tau^{(s)}$. В качестве нулевого приближения при реализации процесса (2.50) выбираем $E_l^0 = 3E/[2(1+\nu)]$.

Вычислив элементы матрицы $[C^{(s)}]$ (2.46), получаем соотношения типа (2.39) и, решив их относительно напряжений, находим

$$\sigma^{(s+1)} = [D]\varepsilon^{(s+1)} + \sigma_0, \tag{2.51}$$

где $[D] = [C^{(s)}]^{-1}$; $\sigma_0 = \sigma^{(s)} - [D]\varepsilon^{(s)}$.

Исходя из того, что напряжения и деформации постоянны в любой точке элемента, имеем

$$\varepsilon = [B]U_\xi; \quad \sigma = [D][B]U_\xi. \tag{2.52}$$

Подставив (2.52) в (2.51), находим

$$\sigma^{(s+1)} = [D][B]U^{(s+1)} + \sigma_0 \quad (2.53)$$

Умножим обе части полученного равенства на $Ah[B]^T$:

$$Ah[B]^T \sigma^{(s+1)} = Ah[B]^T [D][B]U^{(s+1)} + Ah[B]^T \sigma_0, \quad (2.54)$$

где A – общая площадь треугольника; h – толщина элемента.

В соответствии с (2.16) матрица реакций для треугольного конечного элемента имеет вид

$$[R_\xi] = Ah[B]^T [D][B]. \quad (2.55)$$

Произведение следует рассматривать как вектор обобщенных реакций конечного элемента [78, 86], а произведение – как вектор реакций на $(s+1)$ -м приближении, обусловленный наличием вектора (2.51). С учетом сказанного зависимость (2.54) можно записать в виде:

$$N = [R^{(s+1)}] U^{(s+1)} + Q_0^{(s+1)}. \quad (2.56)$$

В результате система уравнений на $(s+1)$ -м приближении принимает вид

$$[P^{(s+1)}] \Delta^{(s+1)} = T - Q^{(s+1)}, \quad (2.57)$$

где T – вектор узловых нагрузок, постоянный для всех приближений (остальные компоненты изменяются от приближения к приближению).

2.4. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ГЕОМЕХАНИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБЪЕМНЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассмотрим трехмерную континуальную область, расчетную схему которой можно представить в виде композиции из четырех-, пяти- и шестигранных конечных элементов [79, 83, 87]. На любой узел в конструкции в общем случае может быть наложено три жестких (или упругих) линейных связи. В качестве внешних воздействий принимаем сосредоточен-

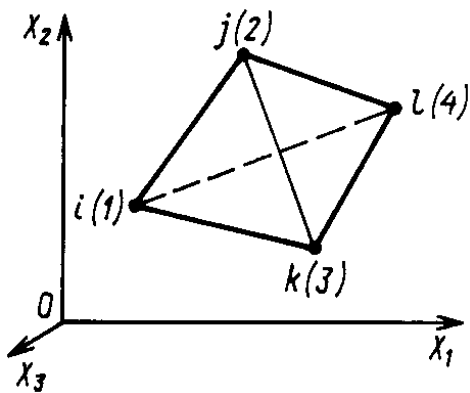


Рис. 1.2. Объемный конечный элемент

ные узловые силы и массовые нагрузки.

На рис. 2.2 показан четырехгранный (тетраэдральный) конечный элемент $ijkl$ в глобальной системе координат $OX_1X_2X_3$. Обход узлов $ijkl$ следует выполнять против часовой стрелки, если смотреть со стороны последнего узла l . Компоненты перемещения произвольной точки элемента с координатами x_1 , x_2 и x_3 можно представить в виде вектора

$$u = [u_x \quad u_y \quad u_z]^T. \quad (2.58)$$

Перемещения узловых точек обозначим u с индексом, соответствующим рассматриваемому узлу, например

$$u_m = [u_{xm} \quad u_{ym} \quad u_{zm}] \quad (m = i, j, k, l) \quad (2.59)$$

Полный вектор узловых перемещений элемента

$$U = [U_i^T \quad U_j^T \quad U_k^T \quad U_l^T]^T. \quad (2.60)$$

Координаты узловых точек образуют матрицу

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & x_{1i} & x_{2i} & x_{3i} \\ 1 & x_{1j} & x_{2j} & x_{3j} \\ 1 & x_{1k} & x_{2k} & x_{3k} \\ 1 & x_{1l} & x_{2l} & x_{3l} \end{bmatrix}. \quad (2.61)$$

Линейную аппроксимацию поля перемещений обеспечивают полиномиальные зависимости

$$u = [\alpha] [1 \quad x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T, \quad (2.62)$$

где $[\alpha]$ – матрица постоянных коэффициентов, значения которых можно найти в результате решения системы линейных алгебраических уравнений, полученных из соотношений (2.62) подстановкой узловых перемещений (2.59) и координат узловых точек (2.61):

$$[\alpha] = [\alpha_{ij}]_{3,4} = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3]^T. \quad (2.63)$$

Систему уравнений (2.62) с учетом (2.61) и (2.63) можно записать в виде

$$\begin{aligned} u_x &= [u_{xi} \quad u_{xj} \quad u_{xk} \quad u_{xl}]^T = [C]\alpha_1; \\ u_y &= [u_{yi} \quad u_{yj} \quad u_{yk} \quad u_{yl}]^T = [C]\alpha_2; \\ u_z &= [u_{zi} \quad u_{zj} \quad u_{zk} \quad u_{zl}]^T = [C]\alpha_3, \end{aligned} \quad (2.64)$$

откуда искомые коэффициенты

$$\alpha_1 = [C]^{-1}u_x; \quad \alpha_2 = [C]^{-1}u_y; \quad \alpha_3 = [C]^{-1}u_z. \quad (2.65)$$

Матрица, обратная $[C]$:

$$[C]^{-1} = [C_{ij}]_{4,4} / |C|, \quad (2.66)$$

где $|C| = 6V$ – определитель матрицы $[C]$, равный шести объемам V тетраэдрального элемента; C_{ij} – алгебраическое дополнение элемента c_{ij} в матрице $[C]$, т. е. взятый с множителем $(-1)^{i+j}$ определитель, полученный из $[C]$, вычеркиванием i -й строки и j -го столбца. В результате вычислений получаем

$$[C]^{-1} = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} a_i & -a_j & a_k & -a_l \\ b_i & -b_j & b_k & -b_l \\ c_i & -c_j & c_k & -c_l \\ d_i & -d_j & d_k & -d_l \end{bmatrix}, \quad (2.67)$$

где

$$\begin{aligned} a_i = \bar{C}_{11} &= \begin{vmatrix} x_{1j} & x_{2j} & x_{3j} \\ x_{1k} & x_{2k} & x_{3k} \\ x_{1l} & x_{2l} & x_{3l} \end{vmatrix}; & b_i = \bar{C}_{12} &= \begin{vmatrix} 1 & x_{2j} & x_{3j} \\ 1 & x_{2k} & x_{3k} \\ 1 & x_{2l} & x_{3l} \end{vmatrix}; \\ c_i = \bar{C}_{13} &= \begin{vmatrix} 1 & x_{1j} & x_{3j} \\ 1 & x_{1k} & x_{3k} \\ 1 & x_{1l} & x_{3l} \end{vmatrix}; & b_i = \bar{C}_{14} &= \begin{vmatrix} 1 & x_{1j} & x_{2j} \\ 1 & x_{1k} & x_{2k} \\ 1 & x_{1l} & x_{2l} \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (2.68)$$

Остальные элементы матрицы (2.67) можно получить круговой перестановкой индексов в формулах (2.68).

В результате получаем формулу, связывающую узловые перемещения (2.60) с координатами и перемещениями произвольной точки элемента:

$$u = \begin{bmatrix} A_i & 0 & 0 & -A_j & 0 & 0 & A_k & 0 & 0 & -A_l & 0 & 0 \\ 0 & A_i & 0 & 0 & -A_j & 0 & 0 & A_k & 0 & 0 & -A_l & 0 \\ 0 & 0 & A_i & 0 & 0 & -A_j & 0 & 0 & A_k & 0 & 0 & -A_l \end{bmatrix} U, \quad (2.69)$$

где $A_m = (a_m + b_m x_1 + c_m x_2 + d_m x_3) / (6V)$ ($m \rightarrow i, j, k, l$).

Так как вектор деформаций для произвольной точки элемента

$$\varepsilon = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx}]^T \quad (2.70)$$

связан с перемещениями (1.58) зависимостями

$$\varepsilon = \left[\frac{\partial u_x}{\partial x_1} \frac{\partial u_y}{\partial x_2} \frac{\partial u_z}{\partial x_3} \frac{\partial u_x}{\partial x_2} + \frac{\partial u_y}{\partial x_1} \frac{\partial u_y}{\partial x_3} + \frac{\partial u_z}{\partial x_2} \frac{\partial u_z}{\partial x_1} + \frac{\partial u_x}{\partial x_3} \right]^T, \quad (2.71)$$

то после дифференцирования получим соотношение

$$\varepsilon = [B]U, \quad (2.72)$$

где

$$[B] = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_i & 0 & 0 & -b_j & 0 & 0 & b_k & 0 & 0 & -b_l & 0 & 0 \\ 0 & c_i & 0 & 0 & -c_j & 0 & 0 & c_k & 0 & 0 & -c_l & 0 \\ 0 & 0 & d_i & 0 & 0 & -d_j & 0 & 0 & d_k & 0 & 0 & -d_l \\ c_i & b_i & 0 & -c_j & -b_j & 0 & c_k & b_k & 0 & -c_l & -b_l & 0 \\ 0 & d_i & 0 & 0 & -d_j & 0 & 0 & d_k & 0 & 0 & -d_l & 0 \\ d_i & 0 & b_i & -d_j & 0 & -b_j & d_k & 0 & b_k & -d_l & 0 & -b_l \end{bmatrix}.$$

Так как матрица $[B]$ не зависит от текущих координат, для тетраэдрального элемента

$$[R] = [B]^T [D][B]V. \quad (2.73)$$

Здесь $[D]$ – матрица упругости порядка 6, ненулевые элементы которой для изотропного материала равны:

$$\begin{aligned} d_{11} = d_{22} = d_{33} &= \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}; \\ d_{12} = d_{21} = d_{13} = d_{31} = d_{23} = d_{32} &= \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}; \\ d_{44} = d_{55} = d_{66} &= \frac{E}{2(1+\nu)}. \end{aligned} \quad (2.74)$$

При действии массовых (объемных) нагрузок $p = [p_1 \quad p_2 \quad p_3]^T$, положительные направления которых совпадают с положительными направлениями глобальных осей X_1, X_2, X_3 необходимо учитывать вектор реакций

$$Q_p = \frac{1}{4}V [p_1 p_2 p_3 \quad p_1 p_2 p_3 \quad p_1 p_2 p_3 \quad p_1 p_2 p_3]^T. \quad (2.75)$$

После компоновки разрешающей системы уравнений и ее решения получаем все компоненты узловых перемещений конструкции, а по ним – любые

параметры НДС. В частности, вектор деформаций (2.71) определяем по формуле (2.72), вектор напряжений

$$\sigma = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx}]^T \quad (2.76)$$

– по формуле

$$\sigma = [D]\varepsilon. \quad (2.77)$$

При вычислении характеристик напряженного состояния (2.76) пяти- и шестигранных конечных элементов можно разбить их на составляющие четырехгранники, вычислить для них по формуле (2.77) соответствующие напряжения и усреднить их сумму.

2.5. ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОРОД

Трудности, возникающие при численной реализации задач сложного нагружения конструкций, обусловлены, в основном, тем, что уравнения состояния, описывающие поведение и разрушение материала расчетной области, являются нелинейными дифференциальными уравнениями неявного вида. Математически задача формулируется как нелинейная краевая задача по пространственным координатам и задача Коши по параметру нагружения (времени) [88-91].

При решении задач такого класса широко применяют итерационные методы, сводящие решение исходной задачи к последовательности решений нелинейных краевых задач на временных слоях. Наибольшее распространение получили одношаговые методы (приращений, прогноза и коррекции). В настоящее время применяют также многошаговые методы (методы Адамса), хотя они не являются самостартующими [83, 89]. При этом используют как явные, так и неявные схемы.

При численном решении задач такого класса крайне важными являются вопросы устойчивости решения ввиду жесткости уравнений. Не менее важны и вопросы достоверности полученных результатов, т.е. вопросы точности и сходимости решения.

Применение схем более высоких порядков для повышения точности решения в большинстве случаев приводит к его неустойчивости, а уменьшение порядка схем для получения устойчивого решения не позволяет найти достоверное решение даже при очень малых шагах. Кроме того, уменьшение шага с некоторого его значения приводит к увеличению погрешности.

Предлагаемый шаговый метод численного решения задач сложного нагружения конструкции разработан исходя из условия обеспечения точности и устойчивости решения, а также экономичности. Рассмотрим основные положения и уравнения предложенной модели неупругого поведения пород горного массива.

Физическая модель поведения породы основана на допущении об однородности и сплошности каждого слоя; в процессе неупругого деформирования в нем может возникать деформационная анизотропия [89]. Порода может быть чувствительна к виду напряженного состояния, т. е. иметь различные характеристики неупругого поведения и разрушения, например при растяжении, сжатии и сдвиге.

Тензор деформации можно представить в виде суммы тензоров упругой деформации, не зависящей от истории нагружения определяющейся конечным состоянием процесса, и неупругой деформации, зависящей от процесса нагружения:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^H. \quad (2.78)$$

Упругие деформации при изменении напряжений следуют обобщенному закону Гука, т. е. для тензора скоростей упругой деформации справедливы уравнения

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^e = \frac{1}{E} [\dot{\sigma}_{ij} - \nu(3\dot{\sigma}\delta_{ij} - \dot{\sigma}_{ij})], \quad (2.79)$$

где E , ν – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона.

Текущему моменту времени процесса нагружения в пространстве составляющих тензора напряжений соответствует поверхность нагружения, разделяющая области упругого и неупругого состояний.

Поверхность нагружения может изотропно расширяться или сужаться, смещаться и изменять форму в процессе нагружения. Начальная поверхность нагружения может иметь форму, отличную от поверхности Мизеса, и стягиваться в точку. Текущая поверхность нагружения определяется процессом нагружения.

Вследствие смещения поверхности нагружения, которое описывается тензором смещения (добавочных напряжений), уравнение поверхности нагружения зависит от инвариантов тензора активных напряжений, составляющие которого отсчитываются от центра поверхности задаваемого тензором смещения. Зависимость поверхности нагружения от первого инварианта тензора напряжений позволяет описать неупругое изменение объема, т. е. деформацию разрыхления. Неупругое изменение объема пренебрежимо мало по сравнению с остальными деформациями практически для всех материалов расчетной схемы, поэтому принимают, что поверхность нагружения зависит только от второго и третьего инвариантов девиатора активных напряжений:

$$f[I_2(D_\sigma^*), I_3(D_\sigma^*)] = 0. \quad (2.80)$$

Зависимость поверхности нагружения от третьего инварианта позволяет описать изменение формы поверхности нагружения и рассмотреть материалы, чувствительные к виду напряженного состояния. Уравнение поверхности нагружения принимает вид

$$f(\sigma_{ij}) = I_2(D_\sigma^*) - C^2 / 3 = 0, \quad (2.81)$$

где $I_2(D_\sigma^*) = s_{ij}^* s_{ij}^* / 2$; $s_{ij}^* = s_{ij} - \alpha_{ij}$; $s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij}$; $\sigma = \sigma_{ij} / 3$.

Тензор α_{ij} характеризует смещение поверхности нагружения, скаляр C соответствует радиусу поверхности. Смещение α_{ij} и радиус C являются функционалами процесса нагружения, причем радиус C зависит от третьего инварианта девиатора активных напряжений.

Для радиуса поверхности нагружения принято уравнение

$$\dot{C} = q_\varepsilon \dot{\varepsilon}_{I^*}^N + q_\mu \dot{\mu}_* - q_R, \quad (2.82)$$

причем

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{I^*}^N &= \left(2 \dot{\varepsilon}_{ij}^N \dot{\varepsilon}_{ij}^N / 3 \right)^{1/2}; & \varepsilon_{I^*}^N &= \int \dot{\varepsilon}_{I^*}^N dt; \\ \dot{\mu}_* &= n_{ij} \dot{s}_{ij}^* / \sigma_I^*; & \sigma_I^* &= \left(3 s_{ij}^* s_{ij}^* / 2 \right)^{1/2}; \\ n_{ij} &= \frac{27 s_{ik}^* s_{jk}^*}{2 (\sigma_I^*)^2} - 3 \mu_* \frac{3 s_{ij}^*}{2 \sigma_I^*} - 3 \delta_{ij}; \\ \mu_* &= \frac{27 I_3(D_\sigma^*)}{2 [3 I_2(D_\sigma^*)]^{3/2}}; & I_3(D_\sigma^*) &= s_{ij}^* s_{jk}^* s_{ki}^* / 3, \end{aligned} \quad (2.83)$$

где $q_\varepsilon, q_\mu, q_R$ – параметры, подлежащие экспериментальному определению; $\varepsilon_{I^*}^N$ – длина дуги неупругой деформации; μ_* – параметр вида активного напряженного состояния ($\mu_* \in [-1, 1]$; при сжатии $\mu_* = -1$, при сдвиге $\mu_* = 0$, при растяжении $\mu_* = 1$); σ_I^* – интенсивность активных напряжений.

Первое и третье слагаемые в уравнении (2.82) описывают упрочнение и разупрочнение, второе – изменение радиуса поверхности при изменении вида напряженного состояния. Знак параметра q_ε зависит от вида материала: для циклически упрочняющихся материалов $q_\varepsilon > 0$; для стабильных $q_\varepsilon = 0$; для разупрочняющихся $q_\varepsilon < 0$. Параметр q_R характеризует механические свойства при отдыхе, отжиге.

Используя свойства пород, установленные экспериментально при скоростях деформирования, при которых эффекты, связанные с длительностью процесса, пренебрежимо малы, т. е. при пластическом деформировании, а также результаты испытаний при установившейся ползучести, параметры $q_\varepsilon, q_\mu, q_R$ можно выразить через функции C_p и C_c [87, 88, 91]:

$$\begin{aligned}
 q_\varepsilon &= \frac{\partial C_p}{\partial \varepsilon_{I^*}^N}; & q_\mu &= \frac{\partial C_p}{\partial \mu_*} q + \frac{\partial C_{p0}}{\partial \mu_*} (1 - q); \\
 q_R &= q_\varepsilon P_c; & q &= \frac{C - C_{p0}}{C_p - C_{p0}}; & \frac{\partial C_{p0}}{\partial (\cdot)} &= \frac{\partial C_p}{\partial (\cdot)} \Big|_{\varepsilon_{I^*}^N = 0}; \\
 C_{p0} &= C_p \Big|_{\varepsilon_{I^*}^N = 0}; & C_p &= C_p(\mu_*, \varepsilon_{I^*}^N); & P_c &= P_c(\mu_*, C, \omega).
 \end{aligned} \tag{2.84}$$

Экспериментально определяемые функции C_p и P_c можно аппроксимировать следующими выражениями:

$$C_p = \begin{cases} C_p^0 + C_p^- - C_p^0 \Big|_{\mu_*}^{n_\mu}, & \text{если } -1 \leq \mu_* < 0; \\ C_p^0 + (C_p^+ - C_p^0) \Big|_{\mu_*}^{n_\mu}, & \text{если } 0 \leq \mu_* \leq 1; \end{cases} \tag{2.85}$$

$$P_c = P_{c0} |C - C_{p0}|^{n_c} (1 - \omega)^{-m_\omega}, \tag{2.86}$$

где $C_p^- = C_p^- \left(\varepsilon_{I^*}^N \right)$; $C_p^0 = C_p^0 \left(\varepsilon_{I^*}^N \right)$; $C_p^+ = C_p^+ \left(\varepsilon_{I^*}^N \right)$; $P_{c0} = P_{c0}(\mu_*)$; $n_c = n_c(\mu_*)$.

Функции P_{c0} и n_c от переменной μ_* можно также аппроксимировать степенной зависимостью вида (2.85).

Следует отметить, что функция P_c зависит от меры повреждения ω , а функция C_{p0} может быть тождественно равна нулю.

Принимают трехчленную структуру уравнений для смещения поверхности нагружения, т. е. разложение девиатора скоростей смещения (добавочных напряжений) осуществляют по компонентам трех девиаторов – скоростей неупругой деформации, добавочных напряжений и неупругих деформаций [91]:

$$\dot{a}_{ij} = \frac{2}{3} g \dot{\varepsilon}_{ij}^N + \left(\frac{2}{3} g_\varepsilon \varepsilon_{ij}^N + g_a a_{ij} \right) \dot{\varepsilon}_{I^*}^N - \left(\frac{2}{3} g_\varepsilon^R \varepsilon_{ij}^H + g_a^R a_{ij} \right). \tag{2.87}$$

Функции g , g_ε , g_a , g_ε^R , g_a^R можно определить по функциям E_{a0} , β , $\tilde{\sigma}_a$, P_a , полученным в результате испытаний в условиях пластического деформирования и установившейся ползучести:

$$\begin{aligned} g &= E_{a0} + \beta \tilde{\sigma}_a; & g_\varepsilon &= \beta E_{a0}; & g_a &= -\beta; \\ g_\varepsilon^R &= g_\varepsilon P_a; & g_a^R &= g P_a / a_N + g_a P_a, \end{aligned} \quad (2.88)$$

где $E_{a0} = E_{a0}(\mu_a)$; $\beta = \beta(\mu_a)$; $\tilde{\sigma}_a = \tilde{\sigma}_a(\mu_a)$; $P_a = P_a(\mu_a, a_I, \omega)$; a_I – интенсивность добавочных напряжений; μ_a – параметр вида добавочного напряженного состояния ($\mu_* \in [-1, 1]$; при сжатии $\mu_a = -1$, при сдвиге $\mu_a = 0$, при растяжении $\mu_a = 1$): $\mu_a = 12,5 I_3(D_a) / \sqrt{3 I_2(D_a)^3}$; $I_2(D_a) = a_{ij} a_{ij} / 2$; $I_3(D_a) = a_{ij} a_{jk} a_{ki} / 3$.

Функции E_{a0} , β , $\tilde{\sigma}_a$, P_a можно аппроксимировать (как и функции C_p , P_c) выражениями

$$E_{a0} = \begin{cases} E_{a0}^0 + (E_{a0}^- - E_{a0}^0) \left| \mu_a \right|^{n_{\mu a}}, & \text{если } -1 \leq \mu_* < 0; \\ E_{a0}^0 + (E_{a0}^+ - E_{a0}^0) \left| \mu_a \right|^{n_{\mu a}}, & \text{если } 0 \leq \mu_* \leq 1; \end{cases} \quad (2.89)$$

$$P_a = P_{a0} (a_I)^{n_a} (1 - \omega)^{-m_\omega}, \quad (2.90)$$

где ($E_{a0} \xrightarrow{\leftarrow} \beta$; $E_{a0} \xrightarrow{\leftarrow} \tilde{\sigma}_a$); $P_{a0} = P_{a0}(\mu_a)$; $n_a = n_a(\mu_a)$.

Аналогично функции P_{a0} , n_a от переменной μ_a можно аппроксимировать степенными зависимостями типа (2.89).

Неупругие деформации зависят от истории нагружения и являются функционалами процесса. Считают, что поле скоростей неупругих деформаций в пространстве напряжений имеет потенциал. Тогда, приняв в качестве потенциала функцию (2.81), получают тензор скоростей неупругой деформации в виде

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^N = \frac{\frac{3}{2} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}}{\sqrt{2 \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}}}} \dot{\varepsilon}_{I^*}^N = \frac{3 n_{ij}^*}{2 n_{I^*}^*} \dot{\varepsilon}_{I^*}^N, \quad (2.91)$$

где

$$\begin{aligned} n_{ij}^* &= s_{ij}^* - 2 q_\mu n_{ij} / 3; & n_{I^*}^* &= \sqrt{3 n_{ij}^* n_{ij}^*} / 2; \\ n_{ij} &= \frac{27 s_{ik}^* s_{jk}^*}{(\sigma_N^*)^2} - 3 \mu_* \frac{3 s_{ij}^*}{2 \sigma_N^*} - 3 \delta; & \mu_* &= \frac{27 I_3(D_\sigma^*)}{2 [3 I_2(D_\sigma^*)]^{3/2}}; \\ I_2(D_\sigma^*) &= s_{ij}^* s_{ij}^* / 2; & I_3(D_\sigma^*) &= s_{ij}^* s_{jk}^* s_{ki}^* / 3. \end{aligned} \quad (2.92)$$

Используя зависимости (2.81)-(21.83), (2.87), (2.91) и (2.92), можно получить уравнения для интенсивности скоростей неупругой деформации

$$\dot{\varepsilon}_I^N = \frac{1}{E_*} \left[\frac{3n_{ij}^* \dot{\sigma}_{ij}}{2n_N^*} + B^R \right], \quad (2.93)$$

где

$$\begin{aligned} E_* &= \sigma_N^* q_\varepsilon / n_N^* + g + g_\varepsilon \varepsilon_I^{N*} + g_a a_N^*; \\ B^R &= \sigma_N^* q_R / n_N^* + g_\varepsilon^R \varepsilon_I^{N*} + g_a^R a_I^*; \\ \dot{\varepsilon}_I^N &= n_{ij}^* \dot{\varepsilon}_{ij}^N / n_N^*; \quad a_I^* = 1,5 n_{ij}^* a_{ij}^* / n_N^*. \end{aligned}$$

Уравнение (2.93) связывает интенсивность скоростей неупругой деформации и скорости напряжений. Аналогично можно получить зависимость интенсивности скоростей неупругой деформации от скоростей деформаций.

Поверхность нагружения разделяет области упругого и неупругого состояний [81]. Если точка, изображающая какое-либо состояние, находится внутри поверхности нагружения, то это состояние упругое, хотя в нем могут происходить процессы возврата механических свойств пород (изменение радиуса и смещения поверхности нагружения). Если изображающая точка принадлежит поверхности нагружения, оно может быть как упругим (предельное состояние), так и неупругим. Условия упругого и неупругого состояний, полученные из условий принадлежности изображающей точки поверхности нагружения и положительности приращения накопленной неупругой деформации, имеют вид

$$\sigma_I^* < C \vee n_{ij}^* \dot{\varepsilon}_{ij}^I \leq 0; \quad \sigma_N^* = C \wedge n_{ij}^* \dot{\varepsilon}_{ij}^N > 0. \quad (2.94)$$

Предлагаемая математическая модель неупругого поведения пород горного массива имеет следующие особенности:

- деформация имеет упругую и неупругую составляющие (условного разделения неупругой деформации на деформации пластичности и ползучести нет);
- поверхность нагружения может смещаться, расширяться или сужаться и изменять форму;
- трехчленная структура уравнений для смещения поверхности нагружения обуславливает снижение ограничений на возможные траектории сложного нагружения;
- зависимость уравнений, описывающих запредельное поведение породы, от меры повреждения позволяет рассматривать разупрочнение материала при ползучести, т. е. третью стадию ползучести;
- математическая модель учитывает зависимость разрушения от вида напряженного состояния;

• основу расчетно-экспериментального метода определения материальных функций модели составляет обработка экспериментальных кривых, не связанная с определением пределов текучести и других величин с какими-либо допусками на деформации, что обычно вносит неоднозначность в получаемые результаты.

Аналитическое интегрирование уравнений предельного поведения для простейших стационарных режимов нагружения приводит к известным критериям малоциклового усталости и длительной прочности.

2.6. ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ И ПОЛЗУЧЕСТИ В ЗАДАЧАХ ГЕОМЕХАНИКИ ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ

При оценке предельного состояния пород для описания процессов неупругого деформирования (пластичности и ползучести) материала при сложном нагружении широко применяют общую математическую теорию пластичности Ильюшина [82], различные варианты теорий пластического течения и ползучести. Однако для выбора варианта теории пластичности или ползучести необходимо предварительно выявить область их применимости с учетом реального процесса нагружения [81, 84, 89]. Границы этой области можно определить путем сопоставления результатов расчета (по различным теориям) и эксперимента при сложном нагружении для широкого спектра траекторий.

Приведем уравнения рассматриваемых вариантов теорий в векторном виде. Компоненты векторов напряжений H и деформаций E согласно теории Ильюшина связаны с тензорами напряжений σ_{ij} и деформаций ε_{ij} формулами

$$\begin{aligned}
 H = \begin{Bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ H_4 \\ H_5 \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} \sqrt{3/2}s_{11} \\ \sqrt{2}(s_{22} + s_{11}/2) \\ \sqrt{2}s_{12} \\ \sqrt{2}s_{13} \\ \sqrt{2}s_{23} \end{Bmatrix}; & s_{ij} &= \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma; \\
 & & \sigma &= \sigma_{ii}/3; \\
 & & H &= (s_{ij}s_{ij})^{1/2} = \sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_I; \\
 & & e_{ij} &= \varepsilon_{ij} - \delta_{ij}\varepsilon; \\
 E = \begin{Bmatrix} \mathcal{E}_1 \\ \mathcal{E}_2 \\ \mathcal{E}_3 \\ \mathcal{E}_4 \\ \mathcal{E}_5 \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} \sqrt{3/2}e_{11} \\ \sqrt{2}(e_{22} + e_{11}/2) \\ \sqrt{2}e_{12} \\ \sqrt{2}e_{13} \\ \sqrt{2}e_{23} \end{Bmatrix}; & \varepsilon &= \varepsilon_{ii}/3; \\
 & & \mathcal{E} &= (e_{ij}e_{ij})^{1/2} = \sqrt{\frac{2}{3}}\varepsilon_I.
 \end{aligned} \tag{2.95}$$

Векторы скоростей напряжений и деформаций, а также длины дуг траекторий определяют по формулам

$$\begin{aligned} H &= [H_1 \ H_2 \ H_3 \ H_4 \ H_5]^T; \quad \Sigma = \int_0^t |H^\cdot| dt = \int_0^t (s_{ij}^\cdot s_{ij}^\cdot)^{\frac{1}{2}} dt; \\ E &= [\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \varepsilon_3 \ \varepsilon_4 \ \varepsilon_5]^T; \quad \Sigma s = \int_0^t |E^\cdot| dt = \int_0^t (e_{ij}^\cdot e_{ij}^\cdot)^{\frac{1}{2}} dt. \end{aligned} \quad (2.96)$$

Угол сближения, т. е. угол между вектором напряжений и вектором скоростей деформаций, направленным по касательной к траектории деформаций, вычисляют по формуле

$$\beta = \arccos \frac{H \cdot E^\cdot}{|H| |E^\cdot|}. \quad (2.97)$$

Результаты сопоставляют как по траекториям напряжений $H = H(s)$ и деформаций $E = E(t)$, так и по параметрам $H = H(s)$ и $\beta = \beta(s)$, характеризующим, соответственно, скалярное и векторное запаздывания.

Для траектории малого кручения и произвольной кривизны в общей математической теории пластичности Ильюшина справедливо уравнение

$$H^\cdot = N \cdot E^\cdot + (P - N) \frac{(H \cdot E^\cdot)}{H^2} H, \quad (2.98)$$

где P и N – функционалы пластичности.

Для траекторий средней кривизны ($\beta < \pi/8$) В.И. Малым предложены зависимости

$$N = \frac{G}{\varphi^*}; \quad P = \frac{d\Phi}{ds}, \quad (2.99)$$

где G – модуль сдвига; $\varphi^* = 0,735$; $\Phi(s)$ – единая кривая деформирования.

В теориях пластического течения при комбинированном упрочнении деформации разделяют на упругую и пластическую:

$$E = E^e + E^p. \quad (2.100)$$

Упругая деформация подчиняется закону Гука, для пластической – принимают ассоциированный закон течения

$$E^e = \frac{H}{2G}; \quad (2.101)$$

$$\dot{E}^p = \begin{cases} \frac{H^*}{H^*} \left| \dot{E}^p \right|, & \text{если } H^* = C_p(s^p) \wedge H^* (H^* \cdot \dot{E}^p) > 0; \\ 0, & \text{если } H^* < C_p(s^p) \vee (H^* \cdot \dot{E}^p) \leq 0, \end{cases} \quad (2.102)$$

где H^* – вектор активных напряжений; $H^* = H - A$; A – вектор смещения центра поверхности нагружения (вектор добавочных напряжений); $H^* = C_p(s^p)$ – уравнение поверхности нагружения; $C_p(s^p)$ – радиус поверхности нагружения; s^p – длина дуги пластической деформации.

Варианты теорий пластичности при комбинированном упрочнении в основном отличаются уравнением для вектора смещения.

Для дифференциальных зависимостей одночленной структуры

$$\dot{A} = g \dot{E}^p \quad (2.103)$$

предложены различные виды функции g : $g = g(A)$ – Ю.И. Кадашевичем и В.В. Новожиловым; $g = g(H)$ – Р.А. Арутюняном; $g = g\left(\frac{A \cdot H^*}{H^*}, \frac{E^p \cdot H^*}{H^*}\right)$ – И.А. Биргером и Б.Ф. Шорром; $g = g\left(A, \frac{A \cdot H^*}{A \cdot H^*}\right)$ – Ю.Г. Коротких [88, 90].

Дифференциальная зависимость для вектора смещения трехчленной структуры согласно обобщенной модели неупругости имеет вид

$$\dot{A} = g \dot{E}^p + (g_E E^p + g_A A) \cdot \left| \dot{E}^p \right|, \quad (2.104)$$

где g , g_E , g_A – экспериментально определяемые константы породы.

Используя уравнения (2.102), (2.104) и уравнение поверхности нагружения [90-92], можно получить зависимость между модулем вектора скорости пластической деформации и векторами скоростей напряжений или деформаций:

$$\left| \dot{E}^p \right| = \frac{1}{E_*} \frac{(H^* \cdot \dot{H})}{H^*}; \quad \left| \dot{E}^p \right| = \frac{2G}{2G + E_*} \frac{(H^* \cdot \dot{E})}{H^*}, \quad (2.105)$$

где

$$E_* = \frac{dC_p}{Ds^p} + g + g_E \frac{(H^* \cdot E^p)}{H^*} + g_A \frac{(H^* \cdot A)}{H^*}.$$

Варианты теорий пластического течения при изотропном или только кинематическом упрочнениях являются частными случаями теории при комбинированном упрочнении; для них справедливы уравнения (2.100)-(2.102), (2.104) и (2.105) соответственно при $g = 0$, $g_E = 0$, $g_A = 0$ или при $dC_p/ds^p = 0$.

В теориях ползучести деформации разделяют на упругую и деформацию ползучести [92]:

$$E = E^e + E^c. \quad (2.106)$$

Для определения вектора скорости деформации ползучести принимают ассоциированный закон течения:

$$\dot{E}^c = \frac{H^*}{H^*} \left| \dot{E}^c \right|, \quad (2.107)$$

где $H^* = H - A$ – вектор активных напряжений; A – вектор добавочных напряжений.

Практически все уравнения, предложенные для вектора скорости добавочных напряжений, имеют двучленную структуру: $\dot{A} = g\dot{E}^c - g_A^R A$.

Вид функций $g_A^R = g_A^R(A)$; $g = g(H)$ – предложен Н.Н. Малининым и Г.М. Хажинским; $g_A^R = g_A^R(A)$; $g = g(A, (A \cdot H^*) / (A \cdot H^*))$ – Ю. Г. Коротких [86, 88]. Для модуля вектора скорости деформации ползучести этими авторами приняты соответственно следующие зависимости:

$$\left| \dot{E}^c \right| = \Phi(H^*); \quad \left| \dot{E}^c \right| = \Phi\left(\frac{H^* - C_n(s^c)}{C_n(s^c)}\right). \quad (2.108)$$

Первая зависимость описывает только кинематическое упрочнение; параметр $C_n(s^c)$, характеризующий изменение размера поверхности нулевой скорости ползучести, во второй зависимости учитывает и изотропное упрочнение.

В теориях неупругости нет условного разделения деформаций пластичности и ползучести; здесь введено понятие суммарной деформации неупругости, т. е. принято, что полная деформация состоит из упругой и неупругой:

$$E = E^e + E^N. \quad (2.109)$$

Для определения вектора скорости неупругой деформации принимают ассоциированный закон течения

$$\dot{E}^N = \frac{H^*}{H^*} \left| \dot{E}^N \right|. \quad (2.110)$$

Уравнения для модуля вектора скорости неупругой деформации, вектора скорости добавочных напряжений и параметра, учитывающего изотропное упрочнение, предложены Миллером в виде

$$|\dot{E}^N| = \Phi(H^*/D); \quad (2.111)$$

$$\dot{A} = g\dot{E}^N - g_A^R(A) \cdot A; \quad (2.112)$$

$$\dot{D} = q(A, D) \cdot |\dot{E}^N| - q_R(D). \quad (2.113)$$

Здесь уравнение для вектора скорости добавочных напряжений имеет двучленную структуру.

Уравнения неупругого состояния (2.111)-(2.113) при скоростях деформации, при которых можно пренебречь временными эффектами, не переходят в уравнения пластичности, которые должны быть для них частным случаем.

Для вектора скорости неупругой деформации в обобщенной модели неупругости принят ассоциированный закон течения с учетом условий упругого и неупругого состояний:

$$\dot{E}^N = \begin{cases} \frac{H}{H^*} |\dot{E}^N|, & \text{если } H^* = C \wedge H^* (H^* \cdot \dot{E}^N) > 0; \\ 0, & \text{если } H^* < C \vee (H^* \cdot \dot{E}^N) \leq 0, \end{cases} \quad (2.114)$$

где C соответствует радиусу поверхности нагружения и учитывает изотропное упрочнение.

Для вектора скорости добавочных напряжений и параметра C предложены уравнения

$$\dot{A} = g\dot{E}^N + (g_E E^N + g_A A) \cdot |\dot{E}^N| - [g_E^R(A) \cdot E^N + g_A^R(A) \cdot A]; \quad (2.115)$$

$$\dot{C} = q_E(s^N) \cdot |\dot{E}^N| - q_R(s^N, C). \quad (2.116)$$

Используя уравнения (2.101), (2.109), (2.114)-(2.116) и уравнение поверхности нагружения, можно получить выражение для модуля вектора скорости неупругой деформации для мягкого и жесткого нагружений:

$$|\dot{E}^N| = \frac{1}{E_*} \left[\frac{(H^* \cdot \dot{H})}{H^*} + B_R \right]; \quad (2.117)$$

$$|\dot{E}^N| = \frac{2G}{2G + E_*} \left[\frac{(H^* \cdot \dot{E})}{H^*} + \frac{B_R}{2G} \right],$$

где

$$E_* = q_E + g + g_E \frac{(H^* \cdot E^N)}{H^*} + g_A \frac{(H^* \cdot A)}{H^*};$$

$$B_R = q_R + g_E^R \frac{(H^* \cdot E^N)}{H^*} + g_A^R \frac{(H^* \cdot A)}{H^*}.$$

В реальных условиях нагружения (особенно при длительных нагрузках) в породе возможно одновременное протекание процессов пластичности и ползучести, причем не всегда можно заранее определить какой из этих процессов будет превалировать. Таким образом, для практических расчетов в задачах геомеханики теории неупругости представляются наиболее практичными.

Полученные аналитические соотношения, положенные в основу расчета методом конечных элементов задач геомеханики, позволяют получить результат вычислительного эксперимента, учитывающий реальные геометрические составляющие расчетной области, нелинейности поведения пород, сложные условия нагружения и взаимного контакта породных слоев, образующих горный массив. Выведенные закономерности легли в основу разработанной математической модели поведения тонкослоистого горного массива в условиях сложного нагружения при нелинейной постановке расчетной задачи и с учетом реальных параметров элементов крепи выработки.

3. ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ В РЕШЕНИЯХ ЗАДАЧ ГЕОМЕХАНИКИ

3.1. РАЗВИТИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Английское Адмиралтейство в 1870 году, спустило на воду новый броненосец «Кэптен». При первом же выходе в открытое море корабль перевернулся. Это было совершенно неожиданно для всех, кроме английского ученого-кораблестроителя В. Рида, который предварительно провел исследования на модели броненосца и установил, что корабль опрокинется даже при небольшом волнении. Но ученому, проделывающему, как казалось, несерьезные опыты с «игрушкой», не поверили лорды из Адмиралтейства.

Модели и моделирование используются человечеством давно. С помощью моделей и модельных отношений развились разговорные языки, письменность, графика. Наскальные изображения наших предков, затем картины и книги – это модельные, информационные формы передачи знаний об окружающем мире последующим поколениям. Модели применяются при изучении сложных явлений, процессов, конструировании новых сооружений. Хорошо построенная модель, как правило, доступнее для исследования, нежели реальный объект. Более того, некоторые объекты вообще не могут быть изучены непосредственным образом.

Рост объема знаний и глубины представления о физических явлениях привел к необходимости создавать более сложные модели, точно описывающие не только предметы, но и процессы. Универсальным подходом, в этом случае, стало математическое моделирование. Математическая модель – это модель реального объекта или процесса, созданная на основе систем математических уравнений, описывающих конкретный процесс или объект. Компьютерная модель – это математическая модель, реализованная компьютерными средствами. Если состояние описываемой системы меняется со временем, то модели называют динамическими, в противном случае – статическими.

Первоначально элементы математики появились в связи с необходимостью решения практических задач: измерение на местности, навигации и т. д. Вследствие этого математика была численной математикой – ее целью являлось получение решения в виде числа. Численное решение прикладных задач всегда интересовало математиков. Крупнейшие математики прошлого сочетали в своих исследованиях изучение явления природы, получение их математического описания и его исследование. Анализ усложненных моделей потребовал создания специальных численных методов решения задач. Название некоторых из таких методов – методы Ньютона, Эйлера, Лобачевского, Гаусса, Чебышева, Эрмита – свидетельствуют о том, что их разработ-

кой занимались крупнейшие ученые своего времени.

Настоящее время характерно резким расширением приложений математики, что связано с созданием и развитием вычислительной техники. Расширение возможностей приложения математики обусловило математизацию других разделов науки: химии, биологии, экономики, психологии и конкретных разделов техники. Процесс математизации состоит в построении математических моделей явлений и разработки методов их исследования. В некоторых направлениях исследования доверие к результатам численных расчетов так велико, что при расхождении между результатами расчетов и результатами эксперимента в первую очередь ищут ошибку в результатах эксперимента.

Вычислительный эксперимент – метод изучения объектов или физических процессов с помощью математического моделирования. Он предполагает, что вслед за построением математической модели проводится ее численное исследование, позволяющее определить поведение исследуемой системы в различных условиях или в различных модификациях [93]. Численное исследование модели дает возможность определять разнообразные характеристики процессов, оптимизировать конструкции или режимы функционирования проектируемых устройств. Случается, что в ходе вычислительного эксперимента исследователь неожиданно открывает новые процессы и свойства, о которых ему ранее ничего не было известно.

Процессы в системе могут протекать по-разному в зависимости от условий, в которых находится система. Следить за поведением реальной системы при различных условиях бывает трудно, а иногда и невозможно. В таких случаях, построив модель, можно многократно возвращаться к начальному состоянию и наблюдать за ее поведением. Этот метод исследования систем называется имитационным моделированием. Теоретическая основа этого метода была известна давно, однако до появления компьютеров этот метод не мог найти сколько-нибудь широкого применения, ибо моделировать случайные величины вручную – очень трудоемкая работа.

Раздел математики, имеющий дело с созданием и обоснованием численных алгоритмов для решения задач различных областей науки, называют прикладной математикой [94]. Главная задача прикладной математики – фактическое нахождение решения с требуемой точностью. Этим она отличается от классической математики, которая основное внимание уделяет исследованию существования и свойств решения. В истории прикладной математики можно выделить три основных периода.

Первый период начался три-четыре тысячи лет назад. Он был связан с вычислением площадей и объемов, расчетами простейших механизмов, иными словами, с несложными задачами арифметики, алгебры и геометрии. Вычислительными средствами служили собственные пальцы, а затем – счеты. Исходные данные содержали мало цифр, и большинство вычислений выполнялось точно, без округлений.

Второй период начался с Ньютона (Исаак Ньютон, 1642-1727). В этот пе-

риод решались задачи астрономии, геодезии и расчета механических конструкций, сводящиеся к обыкновенным дифференциальным уравнениям, либо к алгебраическим системам с большим числом неизвестных. Обычно вычисления выполнялись с округлением, но нередко от результата требовалась высокая точность, так что приходилось сохранять до восьми значащих цифр. Вычислительные средства стали разнообразнее: таблицы элементарных функций, арифмометр, логарифмическая линейка; к концу этого периода появились достаточно сложные калькуляторы механического типа.

Третий период начался с середины 40-х годов XX столетия. Стимулом послужили задачи, возникшие в ходе проведения боевых операций Второй мировой войны. Огромные скорости движения боевых машин нападения (самолетов, танков, кораблей) заставляли разрабатывать эффективные средства активной защиты. За решение этой проблемы взялись крупнейшие умы науки того времени. Среди них был Норберт Винер – известный американский математик.

Рассмотрим, для примера, одну из прикладных задач, которая потребовала решения Винера. Для эффективной стрельбы средств ПВО необходимо предвидеть будущее положение самолета, то есть экстраполировать его траекторию на некоторое время вперед, чтобы снаряд и самолет одновременно прилетели в «точку встречи». Однако точно угадать будущую траекторию самолета невозможно, т.к. летчик, выполняющий противозенитный маневр, может поступить «достаточно» произвольно. Поэтому траекторию следует считать случайной. Таким образом, автомат, ведущий стрельбу, должен предвидеть поведение случайной траектории. А можно ли экстраполировать случайные кривые? Именно такую задачу поставил Н. Винер как математик.

На первый взгляд он взялся за совершенно безнадежную задачу, так как угадать, как пройдет случайная траектория, попросту нельзя. На то она и случайная. Точное предсказание здесь невозможно. Но при стрельбе зенитным снарядом особой точности и не требуется. Да и случайности в траектории самолета не так много, так как его маневр ограничен физическими законами движения самолета и его конструкцией. Оставшуюся неопределенность можно отнести на счет случайности, которую можно предсказать лишь приближенно, статистически. Эту задачу и решил Н. Винер. Способ, предложенный Н. Винером, требовал большого объема вычислений, который необходимо было сделать за те мгновения, пока самолет приближается к цели (2-3 секунды). Стали нужны новые принципы вычислений, исключаящие механику. Описанная тенденция привела к созданию электронных вычислительных машин.

После появления электронных вычислительных машин стали быстро развиваться новые методы, ориентированные прямо на ЭВМ, например, метод Монте-Карло [95]. Численные методы являются одним из мощных математических средств решения задачи. При решении задачи – первая стадия работы – формулировка математической модели (постановка задачи). Для

физического процесса модель обычно состоит из уравнений, описывающих процесс, в эти уравнения в виде коэффициентов входят характеристики тел или веществ, участвующих в процессе. Любое изучаемое явление бесконечно сложно. Оно связано с другими явлениями природы, возможно, не представляющими интереса для рассматриваемой задачи. Математическая модель должна охватывать важнейшие для данной задачи стороны явления. Если математическая модель выбрана недостаточно тщательно, то какие бы методы мы ни применяли для расчета, все выводы будут недостаточно надежны, а в некоторых случаях могут оказаться совершенно неправильными. После того как поставлена задача, разрабатывается алгоритм ее решения, т.е. сам численный метод.

Область применения и возможности вычислительного эксперимента растут вместе с развитием вычислительной техники. Увеличиваются сложности и многообразие решаемых задач. Огромный объем получаемой в ходе эксперимента информации требует адекватных способов ее представления. Вместо массивов числовых данных и простых графиков все шире используются наглядные визуальные образы [95, 96], облегчающие полноценное и своевременное осмысление получаемых результатов.

Отмеченные достоинства вычислительного эксперимента вывели его в число основных методов исследования таких крупных физических и инженерно-технических проблем, как задачи ядерной энергетики, освоения космического пространства, геофизики и др. Программные комплексы, обслуживающие вычислительный эксперимент, объемны и сложны, в их создание вовлечен многочисленный отряд программистов. Поэтому особую актуальность приобретает изучение возникающих здесь конфигурационных построений, которые, как будет видно из дальнейшего изложения, постоянно находятся в центре внимания участников такого рода разработок.

В вычислительном эксперименте программа мыслится как экспериментальная установка, от первых опытов с которой вряд ли следует ожидать сколько-нибудь интересных результатов. Данные первых опытов послужат отправной точкой длительного процесса изменений и усовершенствований установки, который только и способен привести к достаточно обоснованным заключениям об исследуемом объекте.

Таким образом, появление первоначальной версии программы лишь в самых общих чертах намечает направление исследований. Основная же работа по программированию еще впереди – она связана с многократными модификациями программы, отражающими эволюцию математической модели и методов ее расчета. Число циклов вычислительного эксперимента, каждый из которых сопряжен с модификацией расчетной программы, нередко достигает десятков тысяч. Поэтому рациональная организация таких модификаций – ключ к эффективному программированию данного класса задач.

Продолжая параллель с натурным экспериментом, можно заметить, что там обычно не спешат выбрасывать на свалку отдельные узлы, изъятые или замененные в экспериментальной установке при проведении очередного

опыта: они еще не раз могут пригодиться впоследствии. Аналогично и решения (а вместе с ними и соответствующие им фрагменты программ), пересматриваемые на очередном цикле вычислительного эксперимента, как правило, не отбрасываются и могут использоваться затем для других расчетов. Например, метод, оказавшийся непригодным для одной модели, вполне может подойти для расчета следующей модели и т. д.

Сложность реализуемых математических моделей, а также необходимость хранения многочисленных вариантных модулей приводят к тому, что характерные размеры программного фонда вычислительного эксперимента оказываются довольно внушительными [97]. Число участвующих в расчетах модулей здесь нередко достигает нескольких тысяч, а суммарная длина текстов программ – сотен тысяч строк.

Организовать эффективное функционирование и развитие столь обширного, сложного и специфичного программного хозяйства очень нелегко. Тем не менее, жизнь показала, что все возникающие здесь трудности вполне преодолимы – методом вычислительного эксперимента были успешно решены многие важные практические задачи. История программирования задач вычислительного эксперимента насчитывает свыше трех десятилетий, и за это время накоплен весьма значительный опыт, позволяющий говорить о существовании определенной технологии работы с многовариантными программами. Эта технология оказалась достаточно надежной и эффективной; именно добротностью применявшейся технологии объясняется жизнестойкость известных программных реализаций вычислительного эксперимента.

Сложные вычислительные задачи, возникающие при исследовании физических и технических проблем, можно разбить на ряд элементарных – таких как вычисление интеграла, решение дифференциального уравнения и т.п. Многие элементарные задачи являются несложными, они хорошо изучены, для них уже разработаны методы численного решения и имеются стандартные программы решения их на ЭВМ [97, 98]. Иногда приходится слышать, что наступила эпоха ЭВМ, а «ручные» расчеты являются архаизмом. На самом деле это далеко не так. Прежде чем поручить ЭВМ большую задачу, надо сделать много оценочных расчетов и на их основе понять, какие методы окажутся эффективными для данной задачи.

Информационные технологии, поддерживающие вычислительный эксперимент, включают в себя методы построения математических моделей силами конечных пользователей информационных систем. Информационную поддержку их деятельности для поиска и выбора алгоритмов и программ численного решения задач, методы и средства контроля точности производимых вычислений и правильности работы применяемых программ. При проведении вычислительного эксперимента исследователь может с помощью пользовательского интерфейса «проигрывать» на модели, ставя интересующие его вопросы и получая ответы [99]. Таким образом, исследователь получает мощный инструмент для анализа и прогноза поведения сложных нелинейных многопараметрических объектов и явлений, изучение кото-

рых традиционными методами затруднено или вообще невозможно.

Моделирование событий реального мира может производиться многими способами. Явления макромира достаточно хорошо описываются моделями, построенными на математике бесконечного и непрерывного. События же, происходящие в микромире, плохо поддаются описанию подобным способом и требуют применения других принципов моделирования.

Еще в 1970 году А.Н. Колмогоровым давался прогноз, что с «развитием современной вычислительной техники будет во многих случаях разумно изучение реальных явлений вести, избегая промежуточный этап их стилизации, в духе математики бесконечного и непрерывного, переходя прямо к дискретным моделям». Сейчас уже можно с уверенностью сказать, что этот прогноз сбылся, так как появилось большое количество разнообразных математических систем, основанных на принципе мелкозернистого параллелизма, и, самое главное, появились программные и аппаратные комплексы, способные моделировать работу таких систем.

Основной отличительной особенностью систем с мелкозернистым параллелизмом является возможность одновременного (параллельного) изменения состояния всей системы, в то время как каждый участок системы взаимодействует только со своими непосредственными соседями. Это свойство позволяет при моделировании связать события, происходящие на микроуровне, с изменениями макроуровневого моделируемого объекта [100].

Характеризуя вычислительный эксперимент в целом, чрезвычайно важно отметить его универсальность, которая позволяет легко переносить эту технологию на исследование других объектов. Это обстоятельство характерно вообще для математического моделирования и порождено тем, что многие явления и процессы имеют одни и те же математические модели.

Отмеченная многоцелевая направленность и методологическая универсальность вычислительного эксперимента позволяет на основе накопленного опыта математического моделирования, банка вычислительных алгоритмов и программного обеспечения быстро и эффективно решать новые задачи.

Второй особенностью вычислительного эксперимента, как технологии научных исследований, является его междисциплинарный характер. Мы постоянно подчеркиваем это обстоятельство, говоря о том, что прикладной математик объединил теоретика и экспериментатора для более быстрого достижения общей цели. Вычислительный эксперимент может рассматриваться как удобная форма кооперации умственного труда, повышения его производительности [101]. В едином цикле вычислительного эксперимента работает и теоретик, и экспериментатор, и прикладной математик, и программист.

Можно отметить следующие отличительные особенности и преимущества вычислительного эксперимента перед натурным экспериментом.

Во-первых, вычислительный эксперимент проводится даже тогда, когда натурный эксперимент невозможен. Такая ситуация имеет место с крупномасштабными экологическими экспериментами. Отметим в этой связи мо-

делирование глобальных климатических изменений при использовании атомного оружия. Другой пример – исследование процессов при термоядерных параметрах (кроме взрыва атомной бомбы пока нет других возможностей достичь их).

Во-вторых, при использовании вычислительного эксперимента резко снижается стоимость разработок и экономится время. Это обеспечивается многовариантностью выполняемых расчетов, простотой модификации математических моделей для имитации тех или иных реальных условий.

В качестве иллюстрации отметим то, что расчеты на компьютерах в большой степени заменили эксперименты в аэродинамических трубах при создании космического корабля многоразового использования Шатл [98, 99]. Создание новых изделий и технологий связано с необходимостью тяжелой, дорогостоящей и длительной доводкой. Вычислительные средства позволяют в значительной степени сэкономить время и деньги именно на этой стадии.

Вычислительный эксперимент необходимо рассматривать как новую технологию научных исследований в перспективе, как тенденцию, как логику развития организации научных исследований. В настоящее время он, зачастую, реализуется в узком смысле по цепочке «заказчик – прикладной математик». Более тесная увязка теоретических и экспериментальных исследований в единой технологии научных исследований является ярко выраженной тенденцией нашего времени. И примечательно, что основным связующим звеном этой методологии является математическое моделирование и вычислительный эксперимент.

Быстро развивающимся направлением вычислительной математики являются численные методы оптимизации [102]. Задача оптимизации состоит в изучении экстремальных (наибольших или наименьших) значений функционалов на множествах, как правило, весьма сложной структуры. В первую очередь следует упомянуть задачи *математического программирования* (в том числе линейного и динамического), к которым сводятся многие задачи экономики. К задачам оптимизации примыкают минимаксные задачи (и соответствующие численные методы), возникающие при решении задач исследования операций и теории игр. Особенно сложные задачи типа *min/max* возникают при решении многошаговых (динамически развивающихся) игр. Здесь даже математический эксперимент (проигрывание вариантов поведения играющих) невозможен без использования мощных ЭВМ.

Применение ЭВМ к решению сложных задач, в особенности задач больших размеров, вызвало к жизни одно из главных направлений в теории численных методов – исследования устойчивости методов и алгоритмов к различного рода ошибкам (в том числе к ошибкам округления) [103].

Неустойчивые задачи потребовали специального определения понятия приближенных решений и развития соответствующих методов для их нахождения. К неустойчивым задачам относится широкий класс задач, связанных с проблемами автоматизации обработки результатов экспериментов.

Применение ЭВМ непрерывно расширяет круг пользователей и поэтому возникает тенденция такой степени автоматизации, при которой становится менее существенным знакомство пользователей с численными методами. Это предъявляет новые требования к алгоритмам, их классификации и к стандартным программам решения типовых задач.

Появление машин следующего поколения с большим быстродействием сопровождалось ростом числа задач, предъявляемых к решению; в результате этого возникло узкое место системы человек – машина: скорость программирования. Это вызвало к жизни новый этап программирования – создание алгоритмических языков с трансляторами для перевода с алгоритмического языка на внутренний язык машины. Вследствие большей близости алгоритмических языков к общечеловеческому их внедрение упростило программирование и существенно расширило круг пользователей.

Обеспечение функционирования комплексов физико-математического моделирования ведется на основе высокопроизводительных вычислительных средств. Перспективным направлением реализации такой технологии является использование универсальных суперкомпьютеров с массовым параллелизмом и программируемой архитектурой.

Для создания вычислительных систем конкретного приложения разрабатываются инструментальные системы программирования реального времени на основе унифицированных аппаратных средств суперкомпьютеров. Алгоритмически сформулированная для решения задача поступает на формализатор, представляющий собой комплекс программно-математических средств для анализа алгоритма в соответствии с требованиями к параметрам суперкомпьютера. Преобразование алгоритма в форму, эффективную для решения задачи на суперкомпьютере, осуществляется путем преобразования информационного графа задачи в кадровую форму и разделения алгоритма на структурную и процедурную компоненты.

Структурная компонента представляется в виде аппаратно реализуемых фрагментов вычислений (кадров), а процедурная компонента – в виде последовательности их вызова. Формирование процедурной компоненты включает в себя следующие этапы:

- разрезка информационного графа на подграфы по Критерию минимизации времени решения задачи;
- формирование ограничений на размещение данных в каналах распределенной памяти в соответствии с требованиями на допустимое число каналов;
- формирование бесконфликтных структур и синтез процедур адресации и смены коммутации.

Выделение структурной и процедурной компонент алгоритма позволяет определить минимальный базовый граф, правила его наращивания и представить прикладную задачу в виде индуктивной программы. Эта программа может быть выполнена при любом сочетании базовых модулей суперкомпьютера. Параметрами индуктивной программы являются количество базовых

модулей и их сочетания. Трансляция задачи в машинные коды (команда настройки макропроцессоров и коммутаторов, операторы контроллеров расширенной памяти) выполняются на заключительном этапе разработки комплекса.

В последнее время получили широкое распространение программные пакеты, ориентированные на проведение вычислительных экспериментов, создаваемые коммерческими разработчиками для решения отвлеченных научно-практических задач [100, 101, 104]. Данные программные пакеты представляют собой инструментальную среду создания математических моделей, на основе которых затем реализуется вычислительный эксперимент. Рассмотрим наиболее популярные из подобных программных продуктов.

Пакет Mathematica реализован для различных компьютеров – совместимых с IBM PC, Macintosh, рабочих станций Next и Sun, а также суперкомпьютеров Gray. Пакет Mathematica относится к компьютерным системам символьной математики. Эта особенность позволяет получать решения не только для конкретных данных, но и в общем виде. Пакет ориентирован на научных работников и математиков-аналитиков. Он включает в себя большой набор вычислительных методов и алгоритмов, имеет современный интерфейс. Пакет разработан фирмой Wolfram Research Ltd.(США). Первая версия пакета вышла в 1998 г. Программный пакет относится к интерпретирующим системам, реализующим анализ и интерпретацию данных. Вычислительная среда позволяет пользователю самому добавлять новые функциональные возможности, что обеспечивает адаптацию системы под различные специфические задачи. Совершенствование этого программного продукта ведется в направлении разработки универсального ядра системы, обеспечивающего работу на различных вычислительных платформах.

Еще одним мощным математическим инструментарием является пакет MatLab (Matrix Laboratory). Пакет предназначен для математического моделирования и обеспечивает проведение исследований во многих областях научно-технических приложений. Структура пакета позволяет эффективно сочетать различные подходы к созданию математических моделей, включая аналитический и имитационный. В основе имитационного моделирования положен статистический эксперимент. В пакет встроен язык объектно-ориентированного программирования. Около 30 инструментальных приложений пакета позволяют обеспечивать решение дифференциальных и алгебраических уравнений, интегральное исчисление, символьные вычисления и др. Кроме стандартного набора математических функций пакет содержит также и нетрадиционные алгоритмы – средства цифровой обработки изображений, поиска решений на основе нечеткой логики, аппарат построения и анализа нейронных сетей. MatLab может работать с операционными системами Windows, UNIX, MacOS.

Настоящим лидером на рынке математических пакетов является MathCad. Этот программный продукт также как и Mathematica является интерпретирующей системой. Пакет ориентирован на решение разнообразных

задач анализа и интерпретации информации. Среди этих задач следует выделить решение отдельных алгебраических (линейных и нелинейных) уравнений и их систем, обыкновенных дифференциальных уравнений и их систем, дифференциальных уравнений в частных производных, статистическую обработку данных (интерполяцию, экстраполяцию, аппроксимацию и др.), работу с векторами и матрицами, поиск экстремума функциональных зависимостей. В систему интегрированы средства символьной математики, что обеспечивает численное и аналитическое решение различных задач.

Для решения инженерных и научно-практических задач на основе твердотельного моделирования, на данном историческом этапе, используют системы инженерного проектирования (AutoCAD, SolidWorks, Космос 3D). Модели, созданные при помощи этих программных средств, затем, при проведении вычислительного эксперимента, используются в системах инженерных расчетов, таких как NASTRAN, DesingSTAR или Cosmos M. В последнее время, в данном сегменте прикладных исследований, наиболее популярными стали интегрированные системы инженерного проектирования и расчетов, позволяющие не покидать привычной среды разработки изначальной математической модели, тут же выполнять вычисления и обрабатывать получаемые результаты. Примером такой широко распространенной интегрированной системы является SolidWorks Office 2007.

Потребности вычислительного эксперимента при изучении явлений в наиболее сложных областях науки, таких, как проблемы физики элементарных частиц, молекулярной биологии (например, геном человека), геофизики (в частности, физики атмосферы) и др., оказались связанными с необходимостью обеспечить предельно возможные вычислительные мощности. Выход был найден в коллективном использовании вычислительных мощностей, доступных исследователям через компьютерные сети [99]. В развитии так называемых grid-технологий, разрабатываемых мировым сообществом в настоящее время, участвуют и ведущие научные институты бывшего Советского Союза. Идея организации распределенных вычислений в гетерогенной сетевой среде, называемая метакомпьютингом, образно выражается метафорой «grid (сеть)». Подобно тому, как мы подключаем к электросети бытовые приборы, не задумываясь об устройстве этой электросети, сетевые grid-технологии призваны предоставить исследователям требуемые вычислительные мощности как разделяемые ресурсы. В Европе такой сетью должна стать Data Grid.

В настоящее время рынок программных систем в области физико-математических приложений продолжает расти. Новые программные пакеты разрабатываются на основе интенсивно развивающихся компьютерных технологий с использованием достижений современных методов исследований. В результате создаются программные средства, способные решать сложные задачи научно-технических приложений.

3.2. РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

При решении задач геомеханики постоянно приходится сталкиваться с проблемой расчета систем, имеющих сложную геометрическую конфигурацию и нерегулярную физическую структуру. Горный массив и слагающие его породы обладают большим числом характеристик, учет которых при математическом моделировании возможен только при использовании конечно-разностных схем расчетов. В настоящее время стандартом де-факто при решении геомеханических задач стал метод конечных элементов (МКЭ).

С конца 60-х и до середины 80-х годов XX столетия выполнены обширные исследования учеными-механиками (в первую очередь необходимо выделить работы О.К. Зенкевича, Б.З. Амусина, Ж.С. Ержанова, В.Ю. Изаксона, Ю.М. Либермана, А.Б. Фадеева, Е.М. Морозова и др.), которые заложили основу методологии применения МКЭ к решению задач геомеханики в упругой и упруго-пластической постановке. В этот период основной проблемой, препятствующей широкому применению МКЭ в геомеханике, стало несоответствие между сложностью созданных математических моделей и вычислительными мощностями компьютеров.

Основы методологии решения методом конечных элементов большого числа разнообразных задач математической физики изложены в [105]. Для решения физически нелинейных задач было предложено три варианта метода приращений: переменной жесткости, начальных напряжений и начальных деформаций. Использование того или иного метода для расчета конкретной задачи обуславливается особенностями схемы нагружения, условий поведения материалов и комбинацией накладываемых граничных условий. В книге приводится большое число решений прикладных задач, из которых наибольший интерес для анализируемого направления представляют – задача о подкрепленном туннеле и расчет подземной электростанции. Обе задачи рассматривались в плоской постановке и исходя из условий идеального контакта между породным массивом и крепью инженерных сооружений.

При рассмотрении задачи о подкрепленном туннеле в качестве описания поведения среды использована теория прочности Кулона – Мора, которая достаточно адекватно описывает поведение породных массивов. Автором показано, что несмотря на сложность постановки задачи и невозможность применить к площадке текучести (при условии Кулона – Мора) ассоциированный закон, можно, используя метод начальных напряжений, получить адекватное решение по определению геометрических параметров зоны неупругих деформаций в приконтурном породном массиве. Эта задача не отличается высокой сложностью постановки, но позволяет получить точное представление об особенностях определения зон предельного и запредельного равновесия в окрестности подземного инженерного сооружения.

Второй задачей [105] является определение распределения напряжений в районе подземной электростанции с учетом предварительно напряженной

арматуры в железобетонной крепи выработки. В этом случае произведено сравнение результатов, получаемых для обычного упругого решения, и материала, работающего только на сжатие, что в определенной мере характерно для пород горного массива. Проведенные расчеты и полученные результаты позволили автору сделать вывод о незначительных расхождениях в получаемом НДС, что дает право говорить о практически полном совпадении зон повышенных растягивающих напряжений (в упругой постановке задачи) и зон разрушения породы (для материала, работающего только на сжатие).

Другие задачи, приведенные в данной работе, позволяют рассмотреть каждый отдельный аспект физической и геометрической нелинейности. Однако, среди них отсутствуют постановки, требующие комбинированного подхода в учете нелинейностей и, следовательно, серьезно усложняющие методику вычислительных работ.

Применение МКЭ к задачам распределения внутреннего давления в среде с высокой степенью трещиноватости, заполненной жидкостью или продуктами разрушения горных пород рассмотрены в [106]. Приведена методика описания нарушений материалов на макро- и микро уровнях с учетом масштабного эффекта. На основе решения основных тестовых задач сделан вывод о допустимости описания перемещения контактных поверхностей при аппроксимации расчетной модели треугольными элементами первого порядка. В тоже время показано, что для получения адекватных значений внутренних давлений необходимо использовать конечные элементы второго порядка. Задачи решались в плоской постановке для среды вокруг выработки круглого сечения без учета контрактных граничных условий.

Методика решения задач механики разрушения в линейной и нелинейной постановке изложена в работе [107]. Все задачи рассматриваются как плоские, а в основу решения положен метод перемещений с использованием изопараметрических конечных элементов. Главное внимание уделено применению квадратичных элементов, которые за счет использования интерполирующих функций более высокого порядка позволяют строить дискретную модель с меньшим числом степеней свободы. Данная работа одна из немногих, посвященных моделированию процессов трещинообразования на макроуровне в упругой и неупругой среде методом конечных элементов.

Авторы [108] использовали решение МКЭ для определения длины участка установки крепи повышенной несущей способности в зоне сопряжений двух выработок. Решалась пространственная задача в упругой постановке с учетом неоднородности горного массива. В условиях идеального контакта породных слоев, но без учета их анизотропии. Тем не менее, использование конечных элементов второго порядка позволило добиться результата, на основе которого было принято инженерное решение, обеспечившее нормальную работу гидравлических крепей сопряжений механизированных комплексов ОКП. Данное решение является ярким примером, когда в условиях дефицита вычислительных мощностей приемлемый результат МКЭ

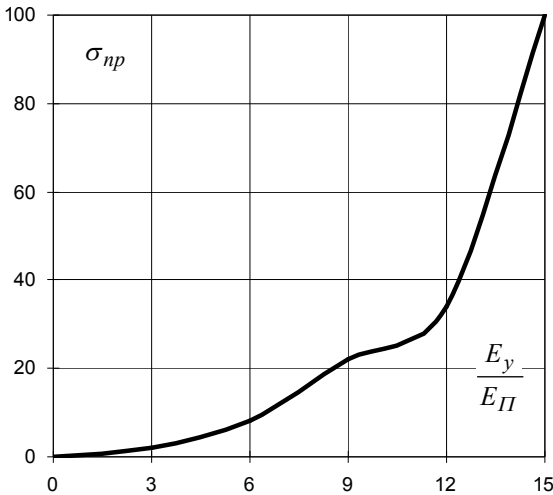


Рис. 3.1. Зависимости приведенного напряжения от отношения модулей упругости угольного пласта и породных слоев

достигается введением конечных элементов более высокого порядка. Подобный подход и сейчас часто встречается при решении задач с большим числом степеней свободы.

Решение задачи по влиянию отношений модулей упругости пласта и окружающего его массива на величину приведенного максимального напряжения дано в [109]. Модель, используемая при решении задачи, представляет собой прямоугольник единичной ширины, образованный тремя четырехугольниками, средним из которых является угольный пласт, а крайние – вмещающие его породные

слои. Угол падения породных слоев составляет 30° , форма выработки – окружность, влияние крепи не учитывалось.

Для трансверсально-изотропного материала горного массива получена зависимость изменения максимального приведенного напряжения от соотношения модулей деформации угольного пласта и пород горного массива (рис. 3.1). Как видно, эта зависимость имеет ярко выраженный нелинейный характер. Кроме того, решение задачи позволяет получить величину зоны неупругих деформаций, зависящую от физико-механических характеристик горного массива. Авторами показана хорошая сходимость полученных решений МКЭ с аналитическим решением. Исключение составили зоны расчетной модели, близкие к вертикальной и горизонтальной осям.

Одним из фундаментальных трудов в области применения МКЭ в задачах геомеханики является работа [110]. В ней авторы рассматривают большой диапазон особенностей, присущих горному массиву, в контексте математического описания для использования с уже существующим математическим аппаратом метода конечных элементов. В частности, рассматриваются особенности расчета трансверсально-изотропного тела с учетом слоистости горного массива. Авторы показывают, как на основе измененного обобщенного закона Гука строится матрица жесткости отдельного элемента, а затем приводят решение для системы плоских треугольных элементов.

Так же в работе [110] рассмотрены методы определения полей напряжений и деформаций в неоднородных средах с учетом взаимодействия крепи с окружающим горным массивом. Авторами показано что, широкий спектр за-

дач на уровне качественного моделирования может быть решен на основе плоской модели однородного упругого анизотропного тела. Хотя сделана оговорка, что полностью описать всю гамму разнообразных реальных свойств горных пород таким образом нельзя.

Для выявления влияния анизотропии на результаты расчетов, получаемых для характерных задач геомеханики, авторы приводят сравнение распределения напряжений вокруг горизонтальной выработки круглого поперечного сечения в изотропном и анизотропном горном массиве.

На приведенных авторами рис. 3.2 и 3.3 изображены изолинии вертикальных и касательных напряжений. Вариант а соответствует изотропному, а вариант б – анизотропному горному массиву. Легко видно что, наибольшее влияние анизотропия оказывает на распределение горизонтальных напряжений, при этом на форму деформирования контура выработки оказывает значительное влияние соотношение модулей упругости в модели анизотропного материала. Влияние анизотропии на распределение касательных напряжений не столь выражено, как в случае с горизонтальными напряжениями. Однако, для варианта анизотропного горного массива рост напряжений в зоне, непосредственно примыкающей к контуру выработки, происходит интенсивней, нежели в случае изотропного массива. Распределение вертикальных напряжений (рис. 3.4) в вертикальном сечении, проходящем через центр выработки, соответствует, в обоих случаях, значениям

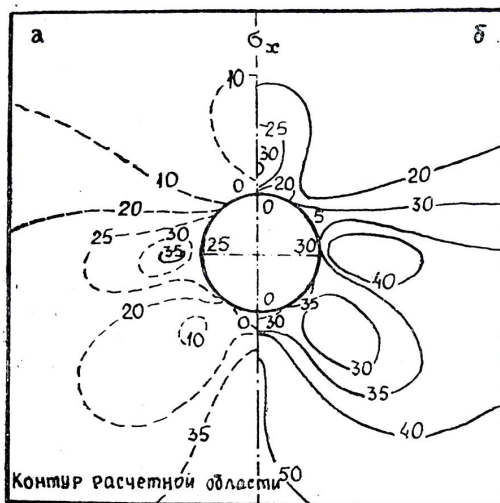


Рис. 3.2. Изолинии горизонтальных напряжений

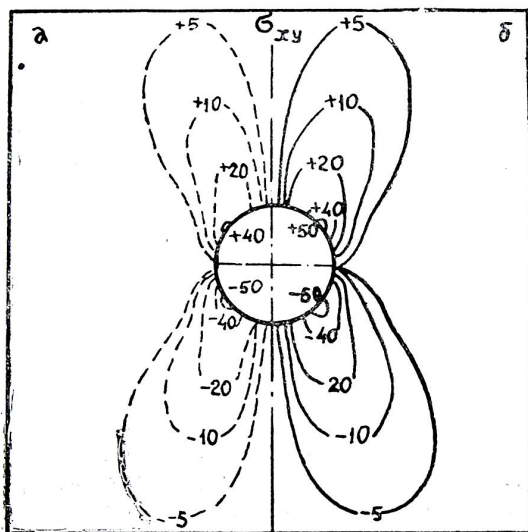


Рис. 3.3. Изолинии касательных напряжений

Однако, для варианта анизотропного горного массива рост напряжений в зоне, непосредственно примыкающей к контуру выработки, происходит интенсивней, нежели в случае изотропного массива. Распределение вертикальных напряжений (рис. 3.4) в вертикальном сечении, проходящем через центр выработки, соответствует, в обоих случаях, значениям

естественных напряжений в породе, не ослабленной выработкой. Кроме того, для обоих вариантов горного массива картины распределения вертикальных напряжений практически совпадают. По утверждению авторов, из этого следует, что анизотропия горных пород не влияет на распределение вертикальных напряжений в зоне, примыкающей к выработке.

Далее авторами показана методика решения упруго-пластической задачи на основе экспериментально полученной билинейной кривой зависимости интенсивности напряжений от интенсивности деформации. Решение получено в обобщенной трехмерной постановке без учета структурной неоднородности горного массива. Для получения численных значений использовался метод переменных параметров упругости. Показано, как на основе вычисления интенсивности напряжений в упругой постановке производится поиск модулей упругости, позволяющий выполнять следующий итерационный расчет. Последовательность таких расчетов при изменяющихся модулях упругости в комбинации с приращением нагрузки, действующей на систему, дает возможность решать упруго-пластические задачи с учетом ниспадающей ветви деформирования горной породы. Однако, несмотря на широкое использование данной методики расчета, при таком подходе остается неясным – насколько адекватны получаемые результаты реально наблюдаемым явлениям.

В работе Фадеева А.Б. [111] значительное внимание уделено учету неоднородности физико-механических показателей пород, слагающих горный массив. Приведена классификация математических моделей пород по их прочностным характеристикам. Породы разделены на три основные группы: слабые породы, средней прочности и крепкие. Показана методика интегрирования математических моделей пород в расчетную схему метода конечных элементов.

Особо следует выделить решение задачи определения НДС горного массива с учетом полной диаграммы «напряжения-деформации» слагающих его пород. Предложенная автором методика поиска решения при помощи метода фиктивных усилий хорошо согласуется с энергетическими представлениями о равновесии сплошной среды в запредельном состоянии материала.

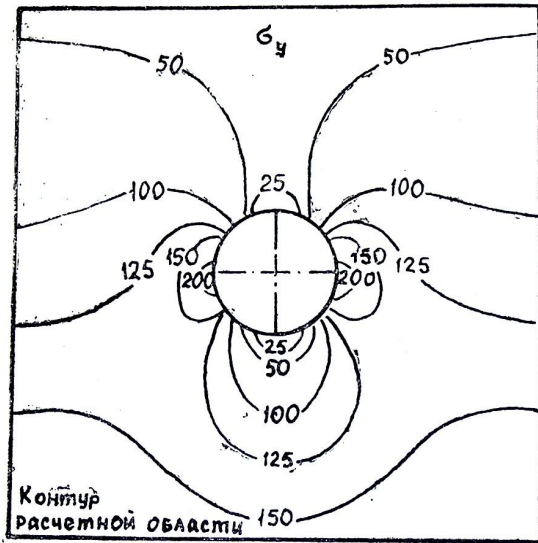


Рис. 3.4. Изолинии вертикальных напряжений

Решение в таком виде хотя и не дает полной однозначности в получаемых результатах, но значительно снижает зависимость точности решения от факторов описания исходной модели. До сих пор данный подход рассматривается как наиболее приемлемый при решении задач, требующих учета поведения материала за пределом прочности.

На основе выше рассмотренных работ коллектив авторов создал и успешно использует вычислительный программный комплекс «Геомеханика» [112]. Данный программный комплекс с высокой степенью достоверности позволяет решать следующие прикладные задачи геомеханики в плоской и осесимметричной постановках:

- определение упруго-пластического НДС;
- консолидация водонасыщенного грунта;
- стационарные и нестационарные температурные задачи, напорной и безнапорной фильтрации, распространения загрязнений;
- оценка сейсмостойкости сооружений.

Однако, комплекс не позволяет решать контактные задачи сложной конфигурации в пространственной постановке и имеет малый набор математических моделей пород, используемых в расчетах. Это несколько сужает круг задач, решение которых при помощи данного программного продукта потенциально возможно.

Решение задачи по определению НДС породного массива, состоящего из слабых грунтов, в условиях фильтрационной консолидации с учетом ползучести скелета грунта приведено в [113]. Автор особо указывает на то, что получить приемлемое решение данной задачи, с точки зрения инженерной надежности, практически невозможно. Задача рассматривается в плоской постановке с учетом реологических характеристик пород. Предложен вид дифференциальных уравнений, описывающих поведение треугольного конечного элемента первого порядка в случае одномерной консолидации грунта двух породных слоев. При решении учитываются начальные условия, связанные с тектоническими и гидростатическими напряжениями в горном массиве.

Получаемые результаты решения основных тестовых задач позволили авторам утверждать, что предложенное ими решение с учетом гидростатических напряжений, возникающих в слабых нарушенных породах под воздействием внешней нагрузки, обладают достаточной точностью для использования в прикладных расчетах геомеханики.

В работе [114] рассмотрены аспекты применения МКЭ для расчета геомеханических явлений с низким внутренним трением, в частности приведено решение задачи для модели обрушенных пород. Расчетная модель задачи, как показано авторами, может быть только пространственной, поскольку необходимо учитывать специфику поведения материала, состоящую в том, что приходится вводить зависимость угла внутреннего трения от геометрических размеров явления. При увеличении размеров явления угол внутреннего трения изменяется и выходит за пределы, которые соответствуют статиче-

скому углу внутреннего трения какой-либо из известных скальных пород. Кроме того, рассматриваемые явления относятся к типу динамических и сопровождаются высокими скоростями деформаций. Поэтому в модель, описывающую движение разрушенной среды с высокими скоростями, введена зависимость сдвиговых напряжений, отвечающих за диссипацию энергии, от интенсивности скоростей сдвиговых деформаций, пропорциональных второму инварианту девиатора скорости деформации. При этом сдвиговые напряжения зависят от прикладываемого давления, однако проведенный анализ показал, что их зависимость от скорости деформации является определяющей. В результате поведение разрушенных пород описывается неньютоновской несжимаемой жидкостью со степенной зависимостью вязкости от величины сдвиговых деформаций. Задача, решенная на основе предложенной методики, позволила получить картину роста перемещений контура породного массива в зависимости от роста зоны разрушенных пород. Сравнение аналитических и конечноразностных методик решения показали хорошую сходимость получаемых результатов.

Авторы работы [115] применили МКЭ для оценки такого быстро протекающего геомеханического явления как лавинообразное разрушение скальных пород на поверхности земной коры. Данная модель была успешно использована для оценки возможных объемов обрушения и дальности распространения каменных лавин Ключевского и Корякского вулканов, расположенных около г. Петропавловск-Камчатский. Хотя рассматриваемая методика не может быть применена для расчетов подземных сооружений, она однако позволяет рассмотреть поведение горных пород в условиях динамического удара в километровом масштабе с учетом объемного эффекта при высоких скоростях деформации. Адаптация этой модели к условиям подземных сооружений позволит использовать разработанный математический аппарат для моделирования быстропротекающих горно-геологических явлений, с которыми все чаще встречаются на больших глубинах.

Решение плоской упруго-пластической задачи для определения физико-механических характеристик инъекционной крепи выработки круглого поперечного сечения использовано в работе [116]. Прочностные и геометрические показатели крепи, создаваемой при помощи химического закрепления пород, проанализированы на основе трех расчетных схем. Выполненный анализ полученных соотношений между давлением нагнетания раствора и модулем упругости закрепляемой области горных пород позволил выбрать оптимальные показатели создаваемой крепи.

Данные результаты сравнили с результатами другого конечно-разностного метода решения, которое продемонстрировало хорошую сходимость для задач подобного типа. Результаты сравнения позволили говорить о приемлемой точности получаемых МКЭ результатов.

Интересная методика применения МКЭ для анализа напряженно-деформированного состояния подземных сооружений приведена в работах [117, 118]. Здесь МКЭ используется для анализа деформаций породного

массива в зоне влияния подземных сооружений. Для моделирования массива используется модель Хука-Брауна. Построение модели горного массива осуществляется на основе данных, полученных географической информационной системой, что обуславливает наличие «реальных» геологических нарушений и других неоднородностей. Трехмерное моделирование при сложном геологическом строении массива и наличии пересекающихся выработок достаточно трудоемко, но результат, получаемый в упругой постановке, по мнению автора, оправдывает затраченные усилия.

Важным выводом, сделанным автором, является утверждение, основанное на сравнении результатов расчетов и натурных измерений. Для получения удовлетворительного приближения расчетов к реальным показателям перемещений горного массива необходимо решать задачу в объемной постановке.

Данная методика не предусматривает рассмотрение особенностей влияния крепи выработок на НДС горного массива, а получаемые результаты используются в качестве первичного приближения при осуществлении мониторинга деформаций породного массива.

С помощью МКЭ в работе [119] проведен анализ поведения кровли очистной выработки в однородном тонкослоистом породном массиве. Результаты были получены для решения плоской задачи в упругой постановке. При этом авторы использовали алгоритм масштабного увеличения перемещений, предложенный Л. Сегерлиндом.

Авторы провели сравнительный анализ распределения напряжений в однородном и тонкослоистом горном массиве. В решении учитывалось взаимное проскальзывание слоев без трения на площадках контакта. Полученные результаты были использованы для решения основной поставленной задачи, а именно, определения геометрических параметров зоны проседания кровли над очистным забоем.

Горный массив в кровле выработки был представлен набором породных слоев одинаковой высоты с одинаковыми физико-механическими характеристиками. В ходе решения задачи определялись размеры зон расслоения горного массива, связанные с опусканием кровли до и после демонтажа крепи. Динамика поведения горного массива связана с движением очистного забоя, которое вносит изменение в НДС конкретной точки горного массива, выбранной на участке контакта породных слоев.

Полученные результаты, как показано авторами, хорошо сходятся с натурными наблюдениями. Однако нужно отметить, что выбранная модель несет в себе ряд условностей, из которых следует особо выделить искусственное определение геометрических параметров породных слоев.

Авторы [120] выполнили расчет параметров пучения почвы выработки в тонкослоистом горном массиве в плоской постановке и без учета влияния крепи. Картина начальных условий, по утверждению самих авторов, сильно идеализирована. Не ясно, выполнялся ли расчет в упругой или упруго-пластической постановке. Однако результаты, полученные в ходе решения

задачи, соизмеримы с реальными показателями пучения в конкретной выработке и составили порядка нескольких десятков сантиметров.

Решение задачи выполнялось в два этапа. На первом этапе были получены первоначальные данные и качественная картина перемещений на контуре и в прилегающем к выработке горном массиве. На втором этапе на основе полученных данных первого этапа в модель внесли изменения в виде двух дополнительных элементов, моделирующих в почве выработки зоны разгрузки и уплотнения пород (рис. 3.5). Потом на основе полученной модели проводили численные эксперименты, позволяющие оценить оптимальные характеристики метода повышения устойчивости выработки.

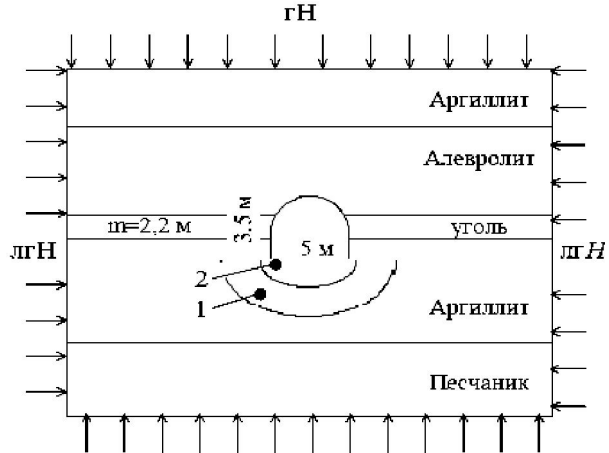


Рис. 3.5. Расчетная модель задачи после корректировки

Задача геомеханики методом конечных элементов использована [121] для проведения анализа влияния главных напряжений на состояние горного массива вблизи выработок большой протяженности. Задача рассмотрена для однородного упругого массива в объемной постановке. Поскольку математически доказано влияние на НДС системы главных напряжений, не совпадающих с осью выработки, для упрощения компьютерной модели обобщенную объемную задачу представили в виде суперпозиции плоской и так называемой антиплоской задачи. В качестве решения задачи принят вектор перемещений любой точки горного массива в зоне влияния выработки круглого сечения. Произведен анализ влияния различных составляющих главных напряжений на НДС горного массива впереди фронта выемки полезного ископаемого. Показано, что при различных значениях тектонических сдвиговых напряжений, направленных вдоль выработки, можно упростить расчетную модель до плоской или обязательно учесть антиплоское решение поставленной задачи. Таким образом, показано, что антиплоскую деформацию необходимо учитывать для определения полей напряжений при выемке запасов крутопадающих рудных тел, а в условиях отработки протяженных пологопадающих залежей допустимо применение решений, отвечающих предположению о плоской деформации.

Математическое моделирование методом конечных элементов процесса зарождения зоны разрушения пород вблизи выработки и закономерности ее формирования в области перераспределения напряжений выполнено в ра-

боте [122]. Поскольку вблизи забоя условие плоской деформации не соблюдается, то воспроизвести реальные деформационные процессы стало возможным при учете всех структурно-механических особенностей среды. Адекватное поведение породного массива в зоне влияния забоя обеспечено заменой пространственной задачи рядом последовательно решаемых плоских. Начальные и граничные условия на каждом шаге задаются исходя из результатов решения на предыдущем.

Разработанный программный продукт позволил путем постепенного сужения факторного пространства получить конфигурации и размеры зон разрушения в окрестности выработки, отвечающие реально проведенным замерам. В качестве одного из учитываемых факторов был выбран временной. Кроме того, выполненный анализ позволил установить стохастическую связь между относительными деформациями и коэффициентами трещинной пустотности пород, что дало возможность путем математического моделирования прогнозировать смещения породного контура в различных направлениях.

В работе [123] методом конечных элементов изучено пространственное напряженно-деформированное состояние при возведении крепи-обделки в забое выработки. Решение задачи выполнялось при различных геометрических параметрах неоднородного слоистого массива для выработки круглого сечения, расположенной в слабых глинистых породах. Особенностью расчетов в данном случае было сравнение величины осадки породного массива под собственным весом без учета влияния сооружаемой выработки и с учетом данного техногенного фактора.

При анализе результатов расчетов было показано влияние способа проведения выработки и временного крепления, устанавливаемого в призабойной зоне, на распределение деформаций и абсолютных значений смещений груди забоя. Разработанная расчетная модель позволяет определить рациональную величину отставания возведения постоянной крепи-обделки от проходческого забоя, параметры обделки и минимизировать, при необходимости, величину мульды оседания дневной поверхности.

Методика, позволяющая избежать итерационного процесса при решении нелинейной задачи геомеханики, приведена в работе [124]. Автором разработана процедура, объединяющая методы переменных параметров упругости и начальных деформаций. В основу данной процедуры положен принцип Родина в конечно-элементной интерпретации, позволяющий определять дополнительные техногенные перемещения на основе изменений исследуемой области исходного поля перемещений. Для описания процесса деформирования во времени используется принцип Вольтера. Решение выполняется для кусочно-линейной диаграммы «напряжения-деформации», характеризующейся модулем упругости, пределом прочности на сжатие, модулем спада и остаточной прочностью породы. Достоинством данного подхода является сочетание простоты вычислений и возможности учета сложного реологического поведения горного массива.

Данная методика расчета была опробована при решении задачи на определение устойчивости кровли выработки в зоне обрушения пород в руднике СКРУ-2 Верхнекамского месторождения калийных солей. Полученные результаты натурных исследований и математического эксперимента показали хорошую сходимость как текущих размеров зон разрушения кровли, так и при их изменении с течением времени.

Комбинированный метод расчета напряженно-деформированного состояния горного массива разработан на основе совместного использования различных конечно-разностных методов [125]. Суть методики расчета состоит в следующем:

- на первом этапе расчета определяется область влияния выработки на окружающий ее горный массив одним из численных методов (МКЭ или граничных элементов) в упругой постановке;
- далее в выделенной области определяется граница зоны разупрочнения массива в соответствии с выбранным критерием прочности. В пределах полученной зоны поведение материала описывается определенными соотношениями разупрочнения породы;
- поведение разрушенного материала внутри зоны разупрочнения анализируется при помощи метода дискретных элементов.

Предложенная методика расширяет возможности расчета горных массивов в нелинейной постановке, но авторы не приводят математическую формулировку задачи, обеспечивающую переход при решении задачи из одной конечно-разностной модели в другую. В частности, остается не раскрытой одна из основных проблем – определение граничных условий на площадках контакта различных конечно-разностных схем.

Автором [126] разработана методика расчета породного массива, ослабленного несколькими системами трещин. Создана математическая модель прочности материала, учитывающая влияние угла наклона системы трещин, пересекающих породу. Предложенная численная модель массива, нарушенного системами трещин, дает возможность наглядно и с достаточной степенью точности оценить напряженно-деформированное состояние трещиноватого массива. В ходе работы выполнено сравнение напряженно-деформированного состояния трещиноватых образцов, рассчитанных методом конечных элементов, с использованием различных моделей сплошной среды и их комбинаций.

Автором показано, что возможность использования численных методов для моделирования сколь угодно больших областей скальных пород позволяет избежать влияния масштабного эффекта, значительно осложняющего исследования природного массива. На основе предложенной модели трещиноватого массива произведен расчет карьера в объемной постановке с целью установления основных закономерностей распределения НДС в окрестности карьерного поля.

В работах Павловой Л.Д. [127, 128] рассмотрены аспекты моделирования объемного предельного напряженного состояния углепородного массива

при подземной отработке свиты пластов. Для проведения расчетов автор разработала пакет компьютерных программ GEOPF-3D, официально зарегистрированный в российском отраслевом фонде алгоритмов и программ. В процессе расчетов учитываются угол внутреннего трения пород, угол падения пластов, физико-механические характеристики отдельных породных пластов. В качестве критерия потери прочности используется обобщенный критерий Кулона-Мизеса, позволяющий существенно упростить процедуру определения границы зоны нарушенных пород. Затем для элементов, попавших в зону разупрочнения, вычисляется коэффициент остаточной прочности породы, используемый в дальнейшем для определения параметров роста зон разупрочненных и разрушенных пород.

Результатом проводимых расчетов являются параметры зон предельного состояния пород, определяемые на основе коэффициента остаточной прочности. К сожалению, приведенные результаты решений не показывают, каким образом была реализована объемная постановка задачи. Автор не учитывает взаимное проскальзывание слоев пород, считает модель горного массива невесомой и не определяет перемещения пород с помощью МКЭ, а так же в расчетах не учитываются особенности взаимодействия крепи и горного массива.

17 сентября 2006 года в городе Геленджик профессором университета Фрайбурга (Германия) Андреас Хенком в рамках обмена опытом был прочитан курс лекций Stress Field Prediction Using 3D Geomechanical Models of Fault-Controlled Reservoirs (Прогнозирование поля напряженности с использованием трехмерной геомеханической модели залежей, включающих тектонические нарушения). В лекциях были изложены методы, используемые в геомеханическом моделировании для километровых масштабов. Особое внимание было уделено методу моделирования, основанном на методике конечного элемента, который дает возможность рассчитывать НДС горного массива даже для гетерогенных структур со сложной геометрией и нелинейным поведением материала. Для этого подхода использовались специальные конечные элементы, определяющие в расчетной модели ранее существующие разломы.

Профессор Хенк привел несколько прикладных задач по проектированию схем бурения горизонтальных скважин, для чего необходим учет тектонической напряженности поля при оптимизации проектирования разработки месторождений и добычи полезных ископаемых. Ориентировка и величина поля напряженности в осадочных породных массивах может значительно изменяться, особенно, около тектонических нарушений, где эти показатели могут значительно отличаться от регионального тренда. Эта особенность данного класса задач приводит к необходимости решения их в пространственной постановке с учетом запредельного поведения пород. При постановке данного типа задач геометрию подземных сооружений и геологических нарушений получают с помощью сейсмических данных, что гарантирует высокую точность геометрии расчетной модели по отношению к реальным ус-

ловиям. Такие геомеханические модели не только обеспечивают информацию о НДС горного массива на текущий момент, но могут использоваться и для изучения картины напряжений и деформаций с течением времени для того, чтобы предвидеть ориентировку и плотность распределения трещин.

Из приведенного краткого анализа видно, что использование метода конечных элементов при решении задач геомеханики находит все более широкий диапазон применения. Постоянно совершенствуется и усложняется методика проведения расчетов при помощи МКЭ. Решение объемной задачи в упруго-пластической постановке в геомеханике стало нормой. Во многих случаях исследователи учитывают большое число факторов и их комбинации, имеющие характеристики локальных возмущений системы. Развитие математических моделей направлено на поиск доступной точности расчета, проводимого по классическим методикам, но учитывающим максимально возможное число уточняющих данных.

По существу анализа работ, посвященных конечно-разностному моделированию геомеханических процессов в окрестности подземных выработок, четко прослеживаются следующие тенденции развития данного направления исследований.

Во-первых, наиболее широко используется метод конечных элементов, имеющий наиболее универсальные возможности. Однако, при решении сложных геомеханических задач, одновременно рассматривающих многофакторность механических свойств пород, неоднородности структуры вмещающего массива и геометрических параметров объекта, возможна комбинация МКЭ, МГЭ и МДЭ для получения более достоверного решения. Основная сложность применения такой комбинации заключается в объективном отражении физической сущности процесса на границе сопряжения элементов модели, которые исследуются различными конечно-разностными методами.

Во-вторых, многие задачи требуют пространственной постановки для более достоверного отражения геомеханических процессов, что и наблюдается на современном этапе оценки состояния массивов горных пород.

В-третьих, все большее число работ посвящается учету неоднородности механических характеристик массива и его структуры, весьма существенно влияющей на результаты расчета поля НДС вокруг выработок, как это было установлено при исследовании широкого круга задач.

В-четвертых, неуклонно расширяется количество работ, в которых учитывается не только пластические и реологические свойства горных пород, но и полная диаграмма их деформирования (предельное и запредельное состояния), что, по мнению авторов, повышает достоверность расчетов и приближает геометрическую модель к реальному объекту.

Можно выделить три основных группы факторов, влияющих на развитие методики применения МКЭ в задачах геомеханики:

- описание физико-механических характеристик пород – постоянно продолжается усложнение описательной части характеристик пород различного

типа и условий их залегания;

- анализ технологических факторов строительства и эксплуатации шахт и подземных сооружений – разработка новых типов и методик использования начальных и граничных условий, применяемых в расчетной модели;
- корректировка теорий прочности и пластичности, используемых при компьютерном моделировании – особенности конечно-разностной схемы позволяют модернизировать условия перехода и развития зон предельного и запредельного состояния материала, получаемых в ходе расчета МКЭ.

Несмотря на широту рассмотренных моделей, тем не менее, видно, что для большинства случаев решения задач геомеханики возможно применение классических математических моделей механики деформируемого твердого тела. Однако, многообразие получаемых решений говорит о практической универсальности МКЭ для задач геомеханики и перспективности развития данного метода расчета в дальнейшем.

3.3. ПОСТАНОВКА И ПОГРЕШНОСТЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Вычислительный эксперимент представляет собой метод исследования сложных проблем, основанный на построении и анализе с помощью вычислительной техники математических моделей изучаемого объекта. История вычислительного эксперимента тесно связана с развитием численных методов и восходит к середине 40-х годов прошлого века. Но математическая сложность вычислений и неэффективность вычислительной техники того времени делали невозможным широкое применение подобного рода экспериментов.

Современные вычислительные комплексы обладают возможностями, позволяющими решать широкий спектр математических задач, требующих значительных затрат по объему вычислений, величине выделяемой памяти и алгебраической точности. Безусловно, наиболее выгодными при разработке программного обеспечения, с точки зрения прикладной математики, являются численные методы. В отличие от аналитических методов решения численные методы позволяют использовать программный продукт, создаваемый на их основе, для решения большого круга задач без серьезного изменения в программном коде [129, 130].

Долгое время компьютерное моделирование нельзя было ставить в один ряд с математическим и лабораторными экспериментами. Однако в настоящее время большинство результатов, получаемых при помощи вычислительных экспериментов, обеспечивают приемлемую точность решения при условии адекватности математической модели [131]. Сейчас системы компьютерного моделирования, создаваемые на основе конечноразностных численных методов, обеспечивают решение инженерных и научно-прикладных задач практически во всех сферах деятельности человека.

Подробно рассмотрим проведение вычислительного эксперимента, взяв за основу приведенную на рис. 3.6 схему.

Объект исследования. Под этим понятием может скрываться какой-то физический объект (горный массив, рамная крепь и т.п.), явление (взаимодействие крепи выработки и породного массива) или процесс (возникновения пучения в выработке под действием реологии пород горного массива). Для определения объекта исследования формулируются основные физические законы, описывающие его поведение с учетом характеристик, качественные и количественные показатели которых должны быть определены в ходе проведения вычислительного эксперимента. Эта процедура получила название идеализации объекта исследования.

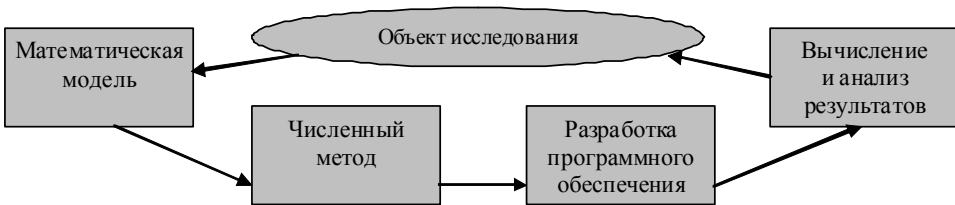


Рис. 3.6. Схема проведения вычислительного эксперимента

Выполняя идеализацию объекта исследования необходимо учитывать два основных правила:

- выполняемая процедура должна привести к упрощению математической модели;
- неучтенные характеристики объекта должны не влиять на выбранную точность вычислительного эксперимента.

Ошибки, допущенные на этапе определения объекта исследований, являются необратимыми и не могут быть компенсированы на следующих этапах вычислительного эксперимента. Такого рода ошибки часто (особенно при решении сложных задач) не поддаются простому анализу, и их выявление требует значительных усилий со стороны экспериментаторов.

Математическая модель. На основе уже сформированной физической модели объекта исследований создается математическая модель. Типичные математические модели, соответствующие физическим явлениям, формулируются в виде уравнений математической физики. Большинство реальных процессов описывается нелинейными уравнениями (например - упругопластическая постановка задачи). Намного реже прибегают к использованию линейных уравнений, применение которых возможно в случаях малых значений параметров, участвующих в вычислениях.

Когда задача сформулирована в математической форме наступает черед ее решения. Как правило, аналитическое решение сложной математической

задачи получить невозможно. Редко результат можно получить в явном виде, например, в виде конечного ряда. Иногда утверждение «задача решена» означает, что доказано существование и единственность решения. Этого недостаточно, необходимо изучить качественное поведение решения и найти необходимые количественные характеристики.

Численный метод представляет собой интерпретацию математической модели, которая доступна для реализации в виде программного кода вычислительных машин. Например, если математическая модель представляет собой дифференциальное уравнение, то численным методом может быть аппроксимирующее его разностное уравнение совместно с алгоритмом, позволяющим получить решение этого разностного уравнения. Результатом реализации численного метода в программном продукте обычно являются совокупность числовых значений, описывающих решение математической задачи.

Выбор численного метода и определение его вычислительных характеристик для конкретной задачи позволяет в значительной степени регулировать процедуру расчета [132]. При этом становится возможным оптимизация вычислительных затрат, обеспечение необходимой точности вычислений и, наконец, выявление критически важных показателей вычислительного эксперимента. Об этих особенностях численных методов подробно будет рассказано ниже.

Разработка программного обеспечения. «Модель-метод-программа» - это и есть триада, составляющая основу вычислительного эксперимента [133]. В настоящее время создание программ стало практически тривиальной задачей. Разработчик, обладающий хорошей математической подготовкой, достаточно легко способен реализовать созданный им алгоритм в виде конечного программного продукта. При этом широкий спектр сред разработки программного обеспечения, большой объем уже накопленных вычислительных библиотек и высокое быстродействие вычислительных комплексов способствует снижению числа и уровня критичности ошибок, возникающих на этапе программирования.

Больше внимания при разработке программ сейчас уделяется процедурам подготовки и представления результатов вычислений.

Вычисление и анализ результатов. Последний этап вычислительного эксперимента технически обеспечивается этапом разработки программного продукта. Только достигнув этого этапа, становится возможным реально оценить правильность сделанных предположений и выбранных методов решений.

Часто при решении сложных задач становится невозможным проведение тестового анализа получаемых результатов. В этом случае отображение процесса вычисления и качественное представление полученных результатов в совокупности с полученными «техническими» данными позволяют косвенно проанализировать и сделать заключение о правильности получаемых результатов.

Процесс исследования исходного объекта методом математического мо-

делирования и вычислительного эксперимента неизбежно носит приближенный характер. Построение любой математической модели всегда связано с идеализацией исходного явления, недостаточно точным заданием коэффициентов уравнений и других начальных значений. По отношению к численному методу, реализующему данную математическую модель, указанные погрешности являются неустранимыми, поскольку они неизбежны в рамках самой модели.

Переход от математической модели к численному методу приводит к возникновению погрешностей, называемых погрешностями метода. Эти погрешности вызваны тем, что любой численный метод воспроизводит исходную математическую модель с определенной точностью. В случае с конечно-разностными (сеточными) численными методами погрешность метода еще называют погрешностью дискретизации.

Простейшим примером дискретизации является построение разностной схемы путем замены дифференциальных выражений конечно-разностными отношениями. Понятно, что решения, получаемые для дискретной модели и изначальной математической модели, будут отличаться. Их разность и называется погрешностью дискретизации.

Любая дискретная модель представляет собой систему большого числа алгебраических уравнений. Найти решение этих уравнений в явном виде, как правило, бывает сложно. Поэтому прибегают к использованию определенного численного алгоритма решения системы уравнений. В результате его применения в ходе вычислений возникает вычислительная погрешность или погрешность округления. Величина данной погрешности определяется точностью представления вещественных чисел аппаратно-программным комплексом вычислительной машины и чувствительностью данного алгоритма к погрешностям округления.

Введем формальное определение погрешностей [130, 134].

Пусть ξ – это точное значение параметра, соответствующее реальному физическому процессу; $\tilde{\xi}$ – значение параметра, соответствующее принятому математическому описанию; $\tilde{\xi}_\Delta$ – решение задачи, получаемое при реализации численного метода без наличия округлений; $\tilde{\xi}_\Delta^*$ – приближение к решению задачи, получаемое при реальных вычислениях.

Тогда $\rho_1 = \tilde{\xi} - \xi$ – неустранимая погрешность, $\rho_2 = \tilde{\xi}_\Delta - \tilde{\xi}$ – погрешность

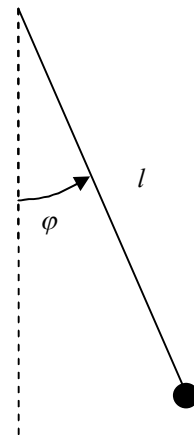


Рис. 3.7. Схема колебания маятника

метода, $\rho_3 = \tilde{\xi}_\Delta^* - \tilde{\xi}_\Delta$ – вычислительная погрешность. Разность между реально получаемым и точным решением задачи называют полной погрешностью.

Таким образом, математическое выражение полной погрешности выглядит следующим образом $\rho = \rho_1 + \rho_2 + \rho_3$.

Теперь проиллюстрируем все вышесказанное несколькими простыми примерами.

Рассмотрим задачу о колебаниях маятника, изображенного на рисунке 3.7. Примем за момент начала движения $t = t_0$. Необходимо определить положение маятника в момент времени t_1 .

Для описаний колебаний маятника используем следующее дифференциальное уравнение

$$l \frac{d^2\varphi}{dt^2} + g \cdot \sin \varphi + \mu \frac{d\varphi}{dt} = 0, \quad (3.1)$$

где l – длина маятника, g – ускорение силы тяжести, μ – коэффициент трения.

Как только принято такое описание, решение задачи уже приобрело неустранимую погрешность. Во-первых, реальное трение зависит от скорости не совсем линейно, а во-вторых, возможны ошибки в определениях l , g , μ .

Далее, дифференциальное уравнение (3.1) не решается в явном виде, для его решения потребуется применить какой-либо численный метод. Как уже было сказано выше, это внесет в вычисления погрешность метода. И наконец, непосредственно при выполнении расчетов за счет округления может возникнуть вычислительная погрешность.

Теперь рассмотрим определения абсолютной и относительной погрешности. Если принять, что a – это точное значение некоторой величины, а a^* – известное приближение к нему, то под абсолютной погрешностью понимают некоторую величину $\Delta(a^*)$, удовлетворяющую следующему выражению

$$|a^* - a| \leq \Delta(a^*).$$

Относительной погрешностью называют некоторую величину $\delta(a^*)$, соответствующую следующему неравенству

$$\left| \frac{a^* - a}{a^*} \right| \leq \delta(a^*).$$

Из представлений о погрешностях дискретизации и округления вытекает следующее определение – алгоритм решения задачи называют устойчивым, если в ходе его работы вычислительные погрешности возрастают незначи-

тельно. В противном случае алгоритм называют неустойчивым.

Приведем пример повышения устойчивости вычислительного алгоритма. Необходимо найти наименьший корень уравнения $y^2 - 140y + 1 = 0$. Будем считать, что вычисления производятся в десятичной системе счисления, причем в мантиссе чисел после округления содержится четыре разряда. Имеем $y = 70 - \sqrt{4899}$, $\sqrt{4899} = 69,99286\dots$; после округления получаем $\sqrt{4899} \approx 69,99$, $y \approx 70 - 69,99 = 0,01$. То же самое значение y можно, избавившись от иррациональности в числителе, представить в виде $y = \frac{1}{70 + \sqrt{4899}}$, $\sqrt{4899} \approx 69,99$, $70 + 69,99 = 139,99$ и после округления $70 + 69,99 \approx 140$. В конечном итоге $\frac{1}{140} = 0,0071428571\dots$, и после округления $y \approx 0,007143$.

В обоих случаях все значащие цифры в результатах вычислений верные, но во втором случае точность результата выше. Дело в том, что в первом случае производилось вычитание близких больших чисел. Поскольку эти числа большие их округление вызвало значительную абсолютную погрешность. Это явление называют потерей значащих цифр.

Требования, выдвигаемые к численным методам должны обеспечивать адекватность дискретной модели исходной математической задаче. Предположим, что дискретная модель представляет собой систему большого числа алгебраических уравнений. Чем больше число уравнений в системе, тем более точный результат будет получен в ходе ее решения. Если при неограниченном увеличении числа уравнений решение дискретной задачи стремится к решению исходной задачи, говорят, что численный метод сходится.

При использовании сеточных методов область изменения независимых переменных заменяется дискретным множеством [129], а входящие в исходное уравнение производные заменяются конечно-разностными выражениями. В результате получаем систему уравнений относительно значений искомой функции в узлах сетки. Известно, что дифференциальные уравнения математической физики являются следствиями интегральных законов сохранения. Исходя из этого, аналоги таких законов сохранения должны выполняться и для разностной схемы. В случае если данное предположение выполняется, подобные численные методы называют консервативными.

Для обеспечения сходимости численного метода необходимо обеспечить его корректность. Допустим, что математическая задача имеет решение, оно единственно и непрерывно зависит от исходных данных. Тогда дискретная модель этой задачи должна соответствовать критериям решения ее в исходной постановке. Таким образом, в понятие корректности численного метода входят свойства однозначной разрешимости соответствующей системы уравнений и ее устойчивости к исходным данным. Здесь под устойчивостью понимается непрерывная зависимость решения от исходных данных, равномерная относительно числа уравнений, составляющих дискретную модель.

Обеспечение сходимости и корректности численных методов невозможно без рассмотрения вопроса о способе приближения функций при численном интегрировании и дифференцировании [131], решения дифференциальных уравнений и др. Одним из распространенных методов приближения функций является интерполяция.

Рассмотрим несколько примеров интерполяции, встречающихся при применении сеточных методов.

Простейшая задача, приводящая к приближению функций, заключается в следующем. В дискретные моменты времени x_1, \dots, x_n наблюдаются значения функции $f(x)$; требуется восстановить ее значения при других x . Аналогичная задача возникает, когда по ходу вычислений компьютеру приходится многократно вычислять одну и ту же сложную функцию в различных точках. Тогда целесообразнее вычислить ее значения в отдельных точках, а в остальных точках получать значения на основе данных, полученных для выбранных точек.

Итак, предположим, что приближающую функцию целесообразно искать в виде

$$f(x) \approx g(x; a_1, \dots, a_n). \quad (3.2)$$

Если параметры a_1, \dots, a_n определяются из условия совпадения $f(x)$ и приближающей функции в точках x_1, \dots, x_n :

$$g(x_i; a_1, \dots, a_n) = f(x_i), \quad i = 1, \dots, n, \quad (3.3)$$

то такой способ приближения называют интерполяцией или интерполированием.

Проведем анализ погрешностей, возникающих при интерполяции. Для этого рассмотрим следующую задачу. Искомая величина y является функцией от параметров a_1, \dots, a_n : $y = y(a_1, \dots, a_n)$. Известна область G в пространстве переменных a_1, \dots, a_n , которой принадлежат эти параметры. Необходимо получить приближение к y и оценить его погрешность.

Если y^* – приближенное значение y , то предельной абсолютной погрешностью $A(y^*)$ называют наилучшую при имеющихся данных оценку погрешности величины y^* . В математической форме получаем

$$A(y^*) = \sup_{(a_1, \dots, a_n) \in G} |y(a_1, \dots, a_n) - y^*|. \quad (3.4)$$

Предельной относительной погрешностью называют величину $\frac{A(y^*)}{|y^*|}$.

Для оценки погрешности большинства функций, описанных подобно y в предыдущем примере, применяются следующие два правила:

- предельная погрешность суммы или разности равна сумме предельных погрешностей;
- предельная относительная погрешность произведения или частного приближенно равна сумме предельных относительных погрешностей.

Рассмотрим простой пример оценки погрешности приближения y^* к корню уравнения $f(y) = a$. Вычислим величину $a^* = f(y^*)$. При малых $y^* - y$ из равенства $f(y) - f(y^*) = a - a^*$ следует, что $f'(y^*) \cdot (y - y^*) \approx a - a^*$. Таким образом

$$y - y^* \approx \frac{a - a^*}{f'(y^*)} = \frac{a - f(y^*)}{f'(y^*)}. \quad (3.5)$$

При наиболее распространенном случае $a = 0$ получаем

$$y - y^* \approx -\frac{f(y^*)}{f'(y^*)}. \quad (3.6)$$

Задача приближения возникает при составлении стандартных программ вычисления элементарных и специальных функций. Такие функции обладают особыми свойствами, позволяющими значительно сократить объем вычислений.

Выполним анализ функций $g(x)$, программы вычислений которых уже присутствуют в вычислительных библиотеках конкретного компьютера и, исходя из выбранной нормы погрешности $\|f - g\|$, определяется функция, расчет которой займет минимальные вычислительные ресурсы.

Обычно норма выбирается в виде $\|f\| = \sup_{[a,b]} |f|$, где $[a, b]$ - отрезок, на котором интерполируется функция.

Довольно часто требуется повышенная точность в отдельных точках. Например, стандартная программа для вычисления синуса обеспечивает малость погрешности в норме

$$\|f\| = \sup_{[0, \pi/2]} |p(x) \cdot f(x)|, \quad p(x) = \min(10^{19}, x^{-1}).$$

Введение множителя $p(x)$ вызывается требованием малой относительной погрешности вычислений функции синуса при малых x .

Рассмотрим другой пример, когда функция задается графиком или сложным аналитическим выражением. Имеем отрезок $[a, b]$, разбитый на l частей:

$$[a_{i-1}, a_i], \quad i = 1, \dots, l, \quad a_0 = a, \quad a_l = b.$$

На каждом отрезке $[a_{i-1}, a_i]$ функция интерполируется многочленом

$$f(x) \approx g(x) = \sum_{k=0}^{n_i} a_k^i x^k \quad (3.7)$$

или дробно-рациональной функцией

$$f(x) \approx g(x) = \frac{\sum_{k=0}^{n_i} a_k^i x^k}{\sum_{k=0}^{m_j} b_k^j x^k} . \quad (3.8)$$

Среди вариантов приближения отыскивается оптимальный в том или ином смысле. Обычно просто накладывается требование $n_1 = \dots = n_l$, $m_1 = \dots = m_l$, фиксируется число отрезков разбиения l и производится оптимизация метода по a_1, \dots, a_{l-1} , n и m .

Вид приближающей функции существенно зависит от цели, с которой осуществляется приближение. Предположим, что с требуемой точностью функция может быть приближена многочленом десятой степени или выражением $a_1 \cdot \sin \omega_1 x + a_2 \cdot \sin \omega_2 x$. Если полученное приближение используется в теоретических исследованиях, то вторая форма записи является более удобной. Но, если значения функции вычисляются при помощи компьютера, вторая форма записи становится неприемлемой, поскольку потребует больше вычислительных ресурсов, чем использование многочлена.

Все вышеизложенное дает возможность составить общее представление о методике подготовки и проведения вычислительного эксперимента, о требованиях, выдвигаемых к численным методам и методикам их применения. В дальнейшем будут рассмотрены сами численные методы, среди которых особую популярность в последнее время приобрел метод конечных элементов.

3.4. РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ АЛГОРИТМА ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Проведенный анализ существующих подходов к расчету НДС породного массива в окрестности одиночной выработки и методов оценки ее устойчивости позволил выработать системную методологию реализации цели исследования по комплексному прогнозу устойчивости пластовой выработки.

Для наглядного восприятия последовательности и взаимосвязи решаемых задач построена общая структурная схема исследований (рис. 3.8) с последующей детализацией основных ее этапов:

– блок I нацелен на исследование НДС системы «массив-крепь», выяв-

ление закономерностей связи поля напряжений и деформаций с геомеханическими и горнотехническими параметрами системы; обоснование комплекса критериев оценки устойчивости и эксплуатационной пригодности выработки, с которыми сравниваются установленные закономерности изменения НДС системы;

– блок II призван довести результаты аналитико-экспериментальных исследований до практических рекомендаций на основе статистической обработки массива данных вычислительного эксперимента, построения эмпирических многофакторных зависимостей и их увязки с комплексом критериев оценки состояния пластовой выработки.



Рис. 3.8. Общая структурно-логическая схема проведения исследований

Практическая ценность исследований включает три составляющих:

- прогноз смещений породного контура выработки, позволяющий определить перемещение любой его точки;
- прогноз состояния произвольного сечения рамной и анкерной крепи и устойчивости в целом;
- прогноз «критической» области соотношения геомеханических и горнотехнических параметров системы «массив-крепь», где требуется проведение

специальных мероприятий по повышению устойчивости выработки.

Рассмотрим более детально задачи, входящие в блок I, выполнение которых разделено на три последовательных этапа. Структура выполнения первого этапа (рис. 3.9), включает в себя три подзадачи, призванные в совокупности наиболее всесторонне и адекватно реальным условиям обосновать геомеханическую модель процессов сдвижения слоистого породного массива в окрестности пластовой выработки. Задачи первого этапа чрезвычайно важны, поскольку от тщательности обоснования расчетных схем, граничных условий и моделей поведения отдельных элементов системы «массив-крепь» зависит надежность конечных результатов по прогнозированию состояния выработки. Эти задачи, несмотря на различие решаемых вопросов, взаимосвязаны между собой единым принципом – обоснование любого положения или допущения производится путем комплекса тестовых расчетов НДС системы «массив-крепь».



Рис. 3.9. Структурная схема выполнения геомеханического обоснования модели деформирования системы «массив-крепь»

Первой задачей является обоснование диапазонов изменения геомеханических и горнотехнических параметров моделируемой системы применительно к условиям шахт, например, Западного Донбасса и включает следующие аспекты:

- наиболее характерный для углевмещающей толщи интервал изменения механических характеристик пород и угля, в том числе, и при предельном состоянии массива;
- глубину расположения пластовых выработок, их охрану и параметры размещения относительно угольного пласта;

– параметры паспорта крепления пластовой выработки с механическими характеристиками рамной крепи, затяжки и материала закрепного пространства. Решения о постоянстве некоторых из вышеприведенных параметров элементов системы «массив-крепь» принимаются по результатам комплекса тестовых расчетов ее НДС и оценки степени влияния каждого из фиксируемых параметров.

Вторая задача – обоснование размеров исследуемой геомеханической модели – включает две позиции:

– во-первых, обоснование параметров негидростатического начального состояния углевмещающей толщи – условия нагружения границ модели;

– во-вторых, размеры модели устанавливаются по результатам тестовых расчетов ее НДС из условия допустимого отклонения действующего поля напряжений от начального негидростатического на границах модели.

Третья задача – обоснование структуры углевмещающей толщи рабочих пластов – наиболее трудоемкая с точки зрения необходимости выполнения большого количества тестовых расчетов НДС системы «массив-крепь» при переменных ее геомеханических и горнотехнических параметрах в установленных ранее диапазонах изменения. Здесь оценивается влияние на НДС системы четырех факторов:

– угол падения угольного пласта;

– мощность угольного пласта и его механические характеристики;

– мощность породных слоев в границах модели и их механические характеристики;

– условия контакта породных слоев по плоскостям напластования: оценивается поле напряжений и сравниваются с прочностными характеристиками по поверхностям контакта слоев; в результате принимается решение о необходимости моделирования нарушения контактов слоев в определенной области системы «массив-крепь».

Как видно из структуры этапа 1 (см. рис. 3.9), все задачи и подзадачи взаимосвязаны, как это имеет место в реальном объекте. Поэтому процедуры тестовых расчетов необходимо повторять при внесении каких-либо изменений в геомеханическую модель, полученных по результатам предыдущих тестовых расчетов ее НДС. Конечным результатом этапа 1 является построение геомеханической модели, отражающей основные черты процесса деформирования слоистого массива вокруг пластовой выработки.

Структура выполнения второго этапа блока I – расчет НДС модели – приведена на рис. 3.10 и включает две последовательно решаемые задачи:

– исследование НДС системы «массив-крепь» при линейной связи напряжений и деформаций в ее элементах;

– исследование НДС системы, для каждого из элементов которой задаются полные диаграммы деформирования, учитывающие стадии разупрочнения и разрыхления (углевмещающая толща), пластического течения и упрочнения материала (рамная крепь), хрупкого разрушения (затяжка) и уплотнения (забутованное закрепное пространство).

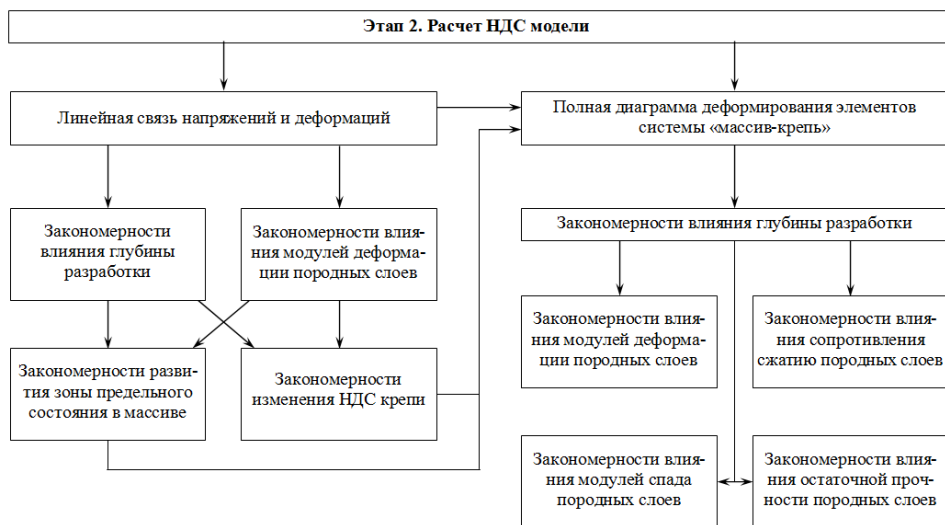


Рис. 3.10. Структурная схема проведения исследования НДС модели

Решение обеих задач предполагает осуществление такого количества вариантов расчета НДС модели, чтобы получить достаточную для практики надежность уравнений множественной корреляции связи полей напряжений и деформаций с основными влияющими параметрами.

Для первой задачи анализируется изменение НДС системы «массив-крепь» с ростом глубины разработки при различных вариантах соотношения модулей деформации близлежащих породных слоев. В результате определяются закономерности развития зон предельного состояния пород вокруг выработки (при заданных прочностных характеристиках породных слоев) и закономерности изменения поля напряжений в рамной и анкерной крепях. Эти результаты используются как самостоятельные рекомендации по поддержанию выработки при ограниченных зонах предельного состояния массива (породы средней крепости) и в качестве вспомогательной функции при решении второй задачи – расчета НДС системы по полной диаграмме деформирования ее элементов. Ввиду того, что параметры полных диаграмм материалов рамной и анкерной крепей, затяжки и закрепного пространства достаточно постоянны, основное внимание уделяется параметрам полной диаграммы деформирования породных слоев углевмещающей толщи. Здесь выявляются многофакторные закономерности развития (с ростом глубины разработки) полей напряжений и деформаций в зависимости от сочетания соотношений механических характеристик близлежащих породных слоев: модулей деформации и спада, сопротивления сжатию целостной породы и ее остаточной прочности на сжатие. Полученные закономерности являются базой для разработки методов оценки устойчивости пластовой выработки.

Третий этап блока I включает комплекс критериев оценки эксплуатационной пригодности выработки, которые оперируют двумя факторами (рис. 3.11):

- напряженным состоянием рамной и анкерной крепей;
- эпюрой перемещения контура выработки.



Рис. 3.11. Структурная схема комплекса критериев оценки состояния выработки

Первый фактор включает условия прочности и устойчивости (при образовании ряда пластических шарниров) рамной и анкерной крепей. Второй фактор отражает эксплуатационные требования, предъявляемые к выработке, надежность и соблюдение правил безопасности при их проветривании, транспорте материалов и оборудования, передвижении людей. Не выполнение какого-либо критерия требует проведения дополнительных мероприятий по повышению устойчивости выработки.

Таким образом, комплекс задач первого блока доставляет все необходимые закономерности и условия для создания практических рекомендаций по прогнозированию устойчивости пластовой выработки в слоистом породном массиве. Приведенная структурная схема выполнения исследований позволяет, на наш взгляд, наиболее адекватно смоделировать особенности деформирования системы «массив-крепь» и максимально достоверно на современном уровне развития геомеханических методов спрогнозировать проявления горного давления.

4. ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМЕ «МАССИВ-КРЕПЬ»

4.1. ОБОСНОВАНИЕ ОБЩИХ ИСХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

На первом этапе исследований максимально адекватно реальным условиям смоделировано сдвижение слоистого породного массива вокруг пластовой выработки. В Западном Донбассе практически повсеместно распространен погоризонтный способ подготовки шахтного поля, при котором основными подготовительными выработками являются пластовые штреки. С точки зрения максимально широкого охвата горно-геологических условий более общей и сложной является геомеханическая модель пластового штрека, проводимого по угольному пласту с присечкой боковых пород. Анализ строения и механических характеристик углевмещающей слоистой толщи слабых пород в окрестности пластового штрека дал следующие результаты.

Во-первых, выполнена оценка размеров модели по вертикальной и горизонтальной координатам Y и X , которые являются минимально достаточными для описания возмущений поля напряжений вокруг штрека, исходя из требования, чтобы компоненты вертикальных σ_y и горизонтальных σ_x напряжений на границах модели приближались к исходному негидростатическому состоянию ($\sigma_y = \gamma H$, $\sigma_x = \lambda \gamma H$) с точностью до 10%, что вполне допустимо для горнотехнических расчетов. В качестве иллюстрации обоснования данного положения на рис. 4.1 и рис. 4.2 приведены компоненты поля напряжений в слоистом породном массиве в окрестности штрека, представленном: пластом угля мощностью $m^y = 0,7$ м с модулем деформации $E^y = 0,35 \cdot 10^4$ МПа, коэффициентом Пуассона $\mu^y = 0,35$, углом внутреннего трения $\varphi^y = 30^\circ$; породными слоями в кровле выработки (нумерация слоев производится от угольного пласта)

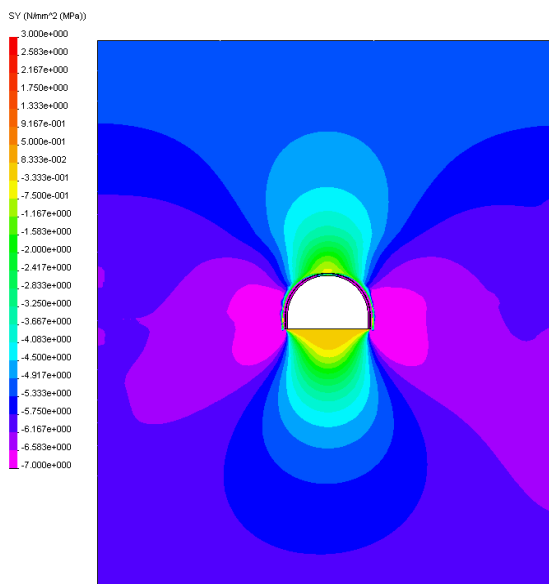
$$m_1^K = 3 \text{ м}, \quad E_1^K = 0,1 \cdot 10^4 \text{ МПа}, \quad \mu_1^K = 0,25, \quad \varphi_1^K = 12^\circ;$$

$$m_2^K = 2 \text{ м}, \quad E_2^K = 0,5 \cdot 10^4 \text{ МПа}, \quad \mu_2^K = 0,25, \quad \varphi_2^K = 30^\circ;$$

$$m_3^K > 12 \text{ м}, \quad E_3^K = 0,28 \cdot 10^4 \text{ МПа}, \quad \mu_3^K = 0,25, \quad \varphi_3^K = 20^\circ;$$

породными слоями m_i^I в почве выработки

а)



б)

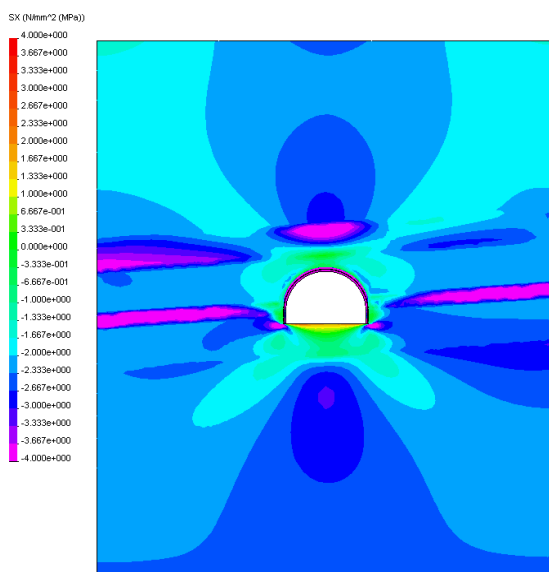
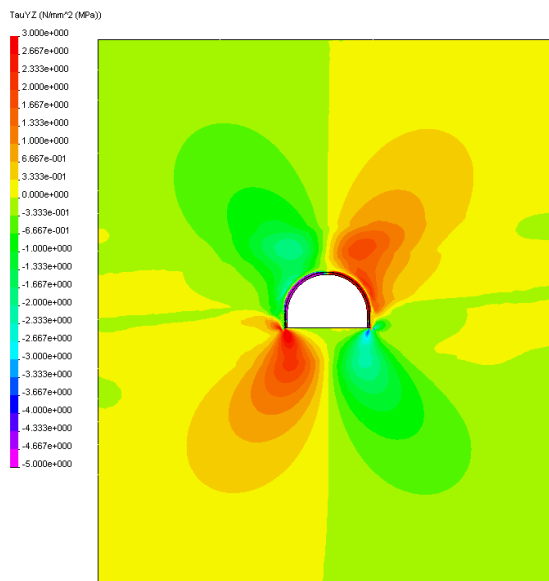


Рис. 4.1. Распределение а) вертикальных σ_y и б) горизонтальных σ_x напряжений в окрестности штрека без нарушения контакта между породными слоями

а)



б)

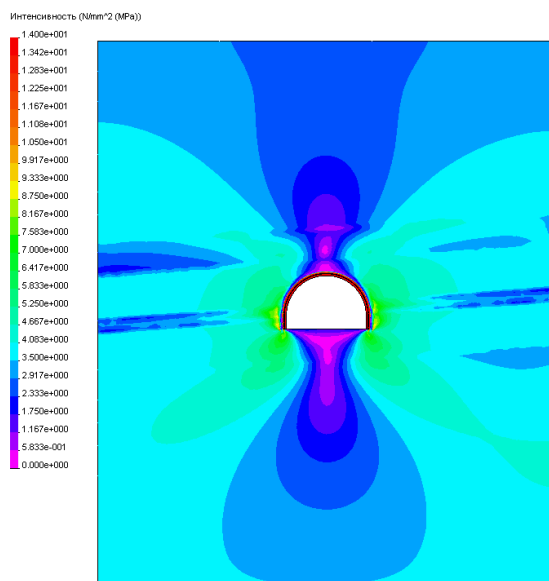


Рис. 4.2. Распределение а) касательных τ_{xy} и б) приведенных σ напряжений в окрестности штрека без нарушения контакта между породными слоями

$$m_1^{\text{II}} = 3 \text{ м}, \quad E_1^{\text{II}} = 0,1 \cdot 10^4 \text{ МПа}, \quad \mu_1^{\text{II}} = 0,25, \quad \varphi_1^{\text{II}} = 12^\circ;$$

$$m_2^{\text{II}} > 14 \text{ м}, \quad E_2^{\text{II}} = 0,28 \cdot 10^4 \text{ МПа}, \quad \mu_2^{\text{II}} = 0,25, \quad \varphi_2^{\text{II}} = 20^\circ.$$

При этом угол падения угольного пласта принят $\alpha = 4^\circ$; размеры выработки в свету: радиус свода $r_\theta = 2,62$ м, высота прямолинейной части стойки $h = 0,9$ м; толщина забутованного закрепного пространства $\delta_3 = 0,2$ м с модулем деформации $E_3^3 = 2 \cdot 10^2$ МПа, $\mu^3 = 0,49$; рамная крепь из СВП-27. Вертикальная нагрузка на верхней границе модели принята $\sigma_y = \gamma H = 5$ МПа, что примерно, соответствует глубине заложения выработки $H \approx 200$ м. На нижней границе модели вертикальная реакция σ_y учитывает γH плюс вес модели. На боковых границах модели горизонтальная нагрузка согласно [3, 135-137], равна

$$\sigma_x = \lambda \gamma H = \frac{\mu}{1 - \mu} \gamma H, \quad (4.1)$$

где μ – коэффициент Пуассона горной породы; γ – средневзвешенный объемный вес породы.

Величина приведенных напряжений σ характеризует интенсивность напряженного состояния породного массива, которая по закону Кулона-Мора, общепринятому для горных пород [3, 135-137], равна

$$\sigma = \sigma_1 - A \sigma_3 = \sigma_1 - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3, \quad (2.2)$$

где σ_1 и σ_2 – максимальные и минимальные главные напряжения по элементарному объему;

φ – угол внутреннего трения горной породы.

В анализируемой модели центр координатных осей Y и X расположен по оси симметрии выработки на высоте h от ее почвы. Вертикальные границы модели имеют координаты: верхняя $y = +18$ м, нижняя $y = -18$ м; боковые границы модели: правая $x = 15$ м, левая $x = -15$ м.

Как видно из рис. 4.1,а, вдоль (по координате X) верхней и нижней границ модели устанавливается равномерное распределение компоненты σ_y , соответствующее величине γH нетронутого массива (5 МПа на верхней границе и 5,9 МПа – на нижней), что указывает на достаточность принятых вертикальных размеров модели. В боках выработки возмущения σ_y , затухают на расстоянии, гораздо меньшем боковых границ модели.

Горизонтальные напряжения σ_x полностью стабилизируются только на нижней границе модели (второй породный слой почвы) и равны $\lambda\gamma H$ нетронутого массива (см. рис. 4.1, б). На верхней и боковых границах модели имеются колебания σ_x , что объясняется возникновением дополнительных изгибающих напряжений σ_x от прогиба породных слоев в полость выработки и не противоречит классическим положениям механики твердого деформируемого тела. Так, на верхней границе модели посередине верхнего породного слоя возникают повышенные сжимающие напряжения всего до 25% от $\lambda\gamma H$, что обусловлено его значительной мощностью и максимальным удалением от выработки. На боковых границах модели кривизна нейтральной оси изгиба ближних к выработке породных слоев (в основном кровли) меняет знак и из-за их небольшой мощности, колебания σ_x возрастают до 100...120% от $\lambda\gamma H$. Это явление обусловлено учетом слоистости массива и (как будет показано в дальнейшем) усиливается при проскальзывании породных слоев друг относительно друга. Также обращает внимание объективно существующий факт повышенных сжимающих напряжений σ_x в угольном пласте, обладающем большей жесткостью и увеличенным коэффициентом Пуассона в сравнении с породными слоями, что характерно для горно-геологических условий Западного Донбасса.

Во-вторых, по эпюрам касательных τ_{xy} и приведенных σ напряжений проанализирована достоверность модели на предмет соответствия классическим представлениям геомеханики деформирования породного массива вокруг выработки. Касательные напряжения τ_{xy} в породном массиве имеют возмущения в окрестности выработки на глубину до $(3,8...4,0r_g)$, а на границах модели практически исчезают, что обусловлено малым углом падения угольного пласта ($\alpha = 4^\circ$) и незначительной разницей между векторами главных напряжений σ_1 и σ_2 , а также векторами напряжений σ_y и σ_x . При этом наблюдается симметричное изменение знака касательных напряжений практически по вертикальной оси выработки. Эти результаты тестирования модели указывают на соответствие результатов классическим положениям механики твердого деформируемого тела [137-141].

Анализ эпюры распределения приведенных напряжений σ , определяемых по формуле (4.2), показывает их полную стабилизацию на нижней границе модели, наиболее интересной в исследованиях анкерного упрочнения почвы выработки. На верхней границе модели колебания σ относительно невелики – до 20...25% и обусловлены прогибом породных слоев в полость выработки. Вблизи штрека наблюдается ярко выраженная область разгруженных пород в кровле и почве, а в боках выработки имеется концентрация напряжений, интенсифицирующая процесс пучения почвы в слабых поро-

дах. Эти результаты согласуются со сложившимися представлениями [8, 137, 140, 142, 143] о геомеханических процессах в окрестности выработки.

В-третьих, проанализировано строение углевмещающей толщи пород в пределах установленной вертикальной высоты модели – $18\text{ м} \leq y \leq 18\text{ м}$. Для рабочих угольных пластов шахт Донбасса их мощность на 93% изменяется в пределах $m^y = 0,7\text{ м} \dots 1,7\text{ м}$ практически постоянными деформационными характеристиками $E^y = 0,35 \cdot 10^4$ МПа и $\mu^y = 0,35$ [144]; прочностные характеристики изменяются в достаточно узком интервале $\sigma_{сж}^y = 30 \dots 40$ МПа, $\varphi^y = 30^\circ \dots 35^\circ$ [144-146]. Близлежащую кровлю угольного пласта ($y \leq 18\text{ м}$) представляют (в 87%...92% случаев) два-три породных слоя, сложенных слабыми аргиллитами, алевролитами и песчаниками. Близлежащая почва ($y \geq 18\text{ м}$) в более, чем 90% случаев состоит из одного-двух слоев тех же слабых горных пород. Эти выводы построены на анализе стратиграфических колонок геологических разрезов рабочих пластов Западного Донбасса. Крайние породные слои кровли и почвы модели имеют повышенную мощность, так как не учитывают маломощные прослойки (до 0,1...0,3 м), оказывающие незначительное влияние на достаточно однородные механические характеристики крайних слоев модели. Механические характеристики породных слоев тщательно исследованы в работах [144-146], анализ которых позволил выбрать (на 85...90%) следующие интервалы их изменения:

аргиллиты – $E_i^{K,II} = (0,1 \dots 0,4) \cdot 10^4$ МПа, $\mu_i^{K,II} = 0,20 \dots 0,30$,

$$\sigma_{сж_i}^{K,II} = 10 \dots 30 \text{ МПа}, \varphi_i^{K,II} = 15^\circ \dots 25^\circ ;$$

алевролиты – $E_i^{K,II} = (0,3 \dots 0,5) \cdot 10^4$ МПа, $\mu_i^{K,II} = 0,20 \dots 0,30$,

$$\sigma_{сж_i}^{K,II} = 15 \dots 40 \text{ МПа}, \varphi_i^{K,II} = 20^\circ \dots 30^\circ ;$$

песчаники – $E_i^{K,II} = (0,5 \dots 1,0) \cdot 10^4$ МПа, $\mu_i^{K,II} = 0,20 \dots 0,30$,

$$\sigma_{сж_i}^{K,II} = 20 \dots 40 \text{ МПа}, \varphi_i^{K,II} = 20^\circ \dots 35^\circ .$$

Следующим этапом обоснования геомеханической модели является оценка параметров пластового штрека и его крепи. Пластовые штреки рабочих горизонтов обычно проводятся сечением в свету до осадки $S_{св} = 12,8\text{ м}^2$, $14,5\text{ м}^2$ и $17,2\text{ м}^2$ [147-149] исключительно арочной формы со сводом, близким к циркульному, для крепи которых наиболее информативными геометрическими параметрами [71] являются радиус свода r_g и высота h прямой части стойки рамы. Практически повсеместно такие выработки

поддерживаются рамной трехзвенной податливой крепью арочной формы из спецпрофиля СВП-22, СВП-27 и СВП-33. Размеры выработки в свету обычно составляют $r_g = 2,32...2,74$ м, $h = 0,9...1,2$ м; после осадки они уменьшаются на величину податливости и можно достаточно обоснованно усреднить высоту $h = 1$ м при интервале изменения $r_g = 2,0...2,5$ м.

На шахтах Западного Донбасса рамная крепь устанавливается вдоль пластового штрека при отсутствии опорно-анкерной крепи, как правило, с шагом 0,5 м, а в качестве межрамного ограждения используется железобетонная затяжка. Для повышения достоверности расчетов моделируется реальная конструкция крепи с детальным воспроизведением ее элементов. В этой связи самым главным решением является построение пространственной модели с дискретной установкой рам вдоль штрека (ось Z) с шагом 0,5 м. Это решение продиктовано также последующим исследованием анкерного упрочнения почвы штрека, где анкера также располагаются по пространственной сетке армирования. Рамы моделируются реальной геометрией поперечного сечения СВП с толщиной спецпрофиля (123 мм для СВП-27 и 137 мм для СВП-33), и шириной (149,5 мм для СВП-27 и 166 мм для СВП-33). Спецпрофиль изготавливается из стали Ст.5 [150] с механическими характеристиками: расчетный предел текучести $\sigma_T = 270$ МПа, модуль упругости $E_p = 21 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu_p = 0,3$. Для металлов приведенное напряжение σ определяется по формуле (4.2) при условии $\varphi = 0$ [151]. Железобетонная затяжка моделируется с реальными параметрами [150]: длина – 500 мм, ширина – 200 мм, толщина 50 мм; модуль деформации материала затяжки $E^3 = 2 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu^3 = 0,2$. Для предотвращения интенсивного вдавливания в слабые породы почвы стоек рамы их, как правило, устанавливают на подпятники, которые моделируются плитой толщиной 20 мм квадратной формы размером 200 x 200 мм. В соответствии с паспортом проведения любой выработки закрепное пространство должно быть тщательно забутовано горной породой или, как это распространено в Западном Донбассе, заполнено тампонажным раствором. Среднестатистическая ширина закрепного пространства по проектным решениям для Западного Донбасса принята равной $\delta_{3,n} = 200$ мм. Деформационные характеристики породной забутовки в первом приближении можно оценить по работам [152, 153] $E^{3ab} = 50$ МПа, $\mu^{3ab} = 0,25$. Механические характеристики тампонажного камня [71, 73, 154] изменяются в интервале $\sigma_{сж}^{3,n} = 5...20$ МПа, $\varphi^{3,n} = 30^\circ...35^\circ$, $E^{3,n} = (1...2) \cdot 10^4$ МПа, $\mu^{3,n} = 0,25...0,3$.

Расположение пластового штрека относительно угольного пласта может выполняться с нижней подрывкой до 1,0...1,3 м или без таковой. Поэтому в модели проанализировано влияние величины нижней подрывки от 0 до 1,3 м.

Подытоживая данный этап обоснования модели следует протестировать

эпюры распределения компонент напряжений в рамной крепи (см. рис. 4.1 и рис. 4.2) на предмет их качественного соответствия существующим представлениям и результатам исследований. В рамной крепи в окрестности замка свода горизонтальные напряжения σ_x имеют близкие к максимуму значения и меняют знак от растяжения во внутренних волокнах до сжатия во внешних, что указывает на наличие максимума изгибающего момента, деформирующего раму внутрь выработки. Максимумы вертикальных напряжений σ_y располагаются ближе к опоре стойки рамы и также меняют знак по толщине сечения, формируя изгибающий момент, деформирующий раму в сторону породного массива, что согласуется с исследованиями [71]. Наибольшие значения приведенных напряжений σ также располагаются в окрестности замка свода и в боках рамы на участке между пятой свода и опорой стойки. Многочисленные шахтные наблюдения подтверждают появление пластических деформаций и разрушение рамной крепи на отмеченных участках.

Заключительный этап обоснования модели касается таких горно-геологических параметров, как угол падения α угольного пласта и глубина H расположения выработки. На шахтах Западного Донбасса угол падения пластов изменяется в пределах $\alpha = 1^\circ \dots 6^\circ$ с наиболее часто встречаемым значением $\alpha = 3^\circ \dots 4^\circ$, которое и принято постоянным ($\alpha = 4^\circ$) во всех дальнейших исследованиях. В настоящее время глубина разработки в Западном Донбассе изменяется от 90 до 585 м. Учитывая завершающуюся отработку верхних пластов, располагаемых на глубине до 200 м, исследуемый диапазон изменения глубины H расположения выработки принят в интервале от 200 до 600 м.

В результате по всем исходным параметрам выполнено геомеханическое обоснование модели для определения НДС породного массива вокруг пластового штрека.

4.2. ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МОДЕЛИ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕЙ ПОРОДНОЙ ТОЛЩИ ВОКРУГ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ

Рассмотрено напряженно-деформированное состояние близлежащего к выработке породного массива в зависимости от его структуры, сложенной из слоев слабых пород, различающихся по мощности и механическим характеристикам. Метод конечных элементов предусматривает построение новой модели каждый раз при изменении каких-либо ее геометрических параметров, что существенно усложняет и увеличивает объем вычислений. Поэтому желательно ограничиться по-возможности меньшим количеством вариантов структуры слоистого массива в окрестности штрека при максимальном их охвате реального строения углевмещающей толщи пород Западного Донбасса. В соответствии с этим по стратиграфическим колонкам рабочих

угольных пластов Западного Донбасса были построены три схемы I, II и III, которые приведены на рис. 4.3. Принцип их построения выбран таков: схема I характеризует, хотя и в некоторой мере усредненную, но не преваляющую структуру пород в окрестности штрека, представленную слоями малой мощности; схема II характеризует противоположную (также не преваляющую) структуру из более мощных породных слоев; схема III наиболее характерна для углевмещающей толщи Западного Донбасса, однако не является всеобъемлющей. Поэтому для максимально достоверного описания НДС углевмещающих пород проведены расчеты для каждой из трех схем и проанализированы особенности их поля напряжений.

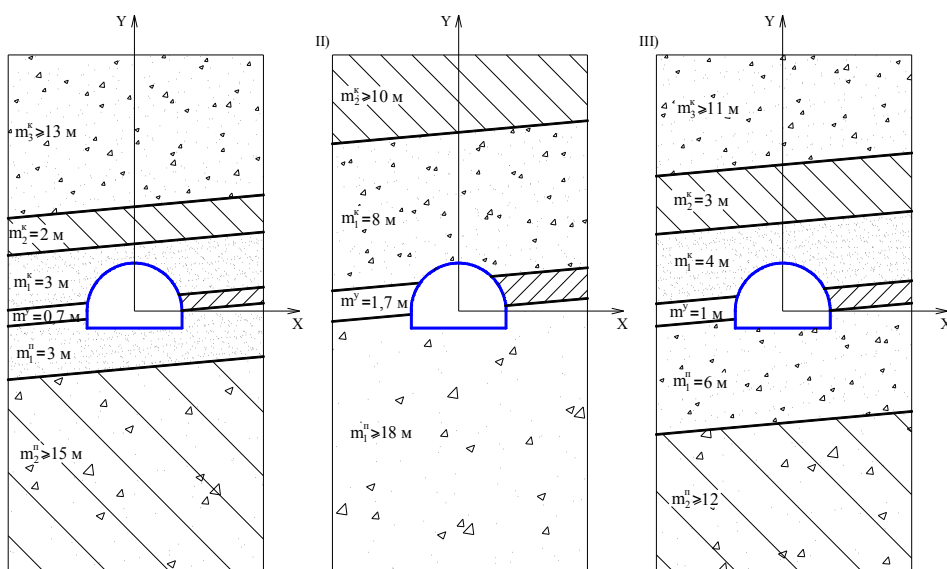


Рис. 4.3. Модели структуры углевмещающей толщи пород Западного Донбасса

Строение углевмещающей толщи характеризуется, помимо указанных параметров, также силами сцепления между отдельными слоями. Общеизвестно [3, 136, 137], что связь породных слоев по плоскостям напластования отличается низкими прочностными характеристиками (особенно в слабых породах Западного Донбасса): сопротивление растягивающим усилиям практически отсутствует, а сопротивление сдвигу понижено иногда на порядок и более по сравнению с породой самого слоя. Поэтому условия сопряжения смежных слоев обоснованы на предмет возможности нарушения их контакта в процессе деформирования и перемещения (проскальзывания) друг относительно друга по плоскостям напластования.

Для всех трех моделей (см. рис. 4.3) расчет НДС выполнен по двум вариантам: без нарушения контакта между слоями и при их взаимном проскальзывании.

вании. 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 $\pm 25^\circ \dots 30^\circ$ вне зависимости от структуры углевмещающей толщи пород и их деформационных характеристик. Также общей закономерностью является повышенная концентрация τ_{xy} в окрестности выработки на глубину до $(2 \dots 2,5)r_g$ при $H = 200$ м, которая увеличивается с ростом глубины H .

Для первоначального анализа НДС рассмотрены три варианта (А, Б и В) механических характеристик углевмещающей толщи пород, которые сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

Механические характеристики	Варианты		
	«А»	«Б»	«В»
Первый породный слой почвы	$E_1^П = 0,1 \cdot 10^4$ МПа $\mu_1^П = 0,25$ $\varphi_1^П = 12^\circ$	$E_1^П = 0,5 \cdot 10^4$ МПа $\mu_1^П = 0,25$ $\varphi_1^П = 30^\circ$	$E_1^П = 0,28 \cdot 10^4$ МПа $\mu_1^П = 0,25$ $\varphi_1^П = 20^\circ$
Второй породный слой почвы	$E_2^П = 0,28 \cdot 10^4$ МПа $\mu_2^П = 0,25$ $\varphi_2^П = 20^\circ$	$E_2^П = 0,28 \cdot 10^4$ МПа $\mu_2^П = 0,25$ $\varphi_2^П = 20^\circ$	$E_2^П = 0,28 \cdot 10^4$ МПа $\mu_2^П = 0,25$ $\varphi_2^П = 20^\circ$
Угольный пласт	$E^Y = 0,35 \cdot 10^4$ МПа $\mu^Y = 0,35$ $\varphi^Y = 30^\circ$	$E^Y = 0,35 \cdot 10^4$ МПа $\mu^Y = 0,35$ $\varphi^Y = 30^\circ$	$E^Y = 0,35 \cdot 10^4$ МПа $\mu^Y = 0,35$ $\varphi^Y = 30^\circ$
Первый породный слой кровли	$E_1^K = 0,1 \cdot 10^4$ МПа $\mu_1^K = 0,25$ $\varphi_1^K = 12^\circ$	$E_1^K = 0,5 \cdot 10^4$ МПа $\mu_1^K = 0,25$ $\varphi_1^K = 30^\circ$	$E_1^K = 0,28 \cdot 10^4$ МПа $\mu_1^K = 0,25$ $\varphi_1^K = 20^\circ$
Второй породный слой кровли	$E_2^K = 0,5 \cdot 10^4$ МПа $\mu_2^K = 0,25$ $\varphi_2^K = 30^\circ$	$E_2^K = 0,1 \cdot 10^4$ МПа $\mu_2^K = 0,25$ $\varphi_2^K = 12^\circ$	$E_2^K = 0,28 \cdot 10^4$ МПа $\mu_2^K = 0,25$ $\varphi_2^K = 20^\circ$
Третий породный слой кровли	$E_3^K = 0,28 \cdot 10^4$ МПа $\mu_3^K = 0,25$ $\varphi_3^K = 20^\circ$	$E_3^K = 0,28 \cdot 10^4$ МПа $\mu_3^K = 0,25$ $\varphi_3^K = 20^\circ$	$E_3^K = 0,28 \cdot 10^4$ МПа $\mu_3^K = 0,25$ $\varphi_3^K = 20^\circ$

Вариант А распределения τ_{xy} приведен в качестве примера на рис. 4.2, а, для модели I при $H = 200$ м. Предварительно следует отметить, что в силу указанных выше причин силы сцепления по плоскостям напластования невелики и составляют десятые доли (реже единицы) МПа.

Поэтому область действия повышенных τ_{xy} оценена по сравнимой со сцеплением при величине $\tau_{xy} = (0,4...0,8)$ МПа. Эта область в модели I распространяется в кровле до $2r_g$, а в почве – до $2,5r_g$ при повышенной деформативности близлежащих (к угольному пласту) породных слоев кровли и почвы (вариант А). При пониженной деформативности близлежащих породных слоев область концентрации τ_{xy} снижается в кровле до $1,2r_g$, в почве – до $1,5r_g$. Однако сама величина τ_{xy} непосредственно в приконтурных породах имеет обратную тенденцию и вполне логично увеличивается (до 4...5 МПа) при повышенной жесткости примыкающего к выработке породного слоя. В модели II с примыкающими породными слоями большей мощности влияние их жесткости увеличивает на 15...20% область концентрации τ_{xy} , а сама их величина снижается. Распределение τ_{xy} в модели III имеет аналогичные тенденции.

Таким образом, установлено, что при $H = 200$ м в области до $(2...3)r_g$ касательные напряжения τ_{xy} могут превышать силы сцепления породных слоев по плоскостям напластования, что приводит к нарушению их контакта и проскальзыванию друг относительно друга. Данный фактор усиливается с ростом глубины H расположения выработки, так как установлена практически линейная связь параметра H с величиной τ_{xy} и размерами области их концентрации. Отсюда следует логичный вывод о том, что для повышения достоверности моделирования необходимо рассматривать слои с нарушенными контактами и ввести условие возможности их проскальзывания друг относительно друга. Также следует отметить высокую концентрацию τ_{xy} (от -83 МПа до $+81$ МПа) стабильно располагающуюся в опорах стойки рамы, что необходимо учитывать при оценке ее устойчивости.

В соответствии с полученными результатами следующим этапом исследований был выполнен расчет НДС (при проскальзывании слоев) трех моделей (см. рис. 4.3) по вариантам А, Б и В (см. таблицу 4.1) соотношения механических характеристик породных слоев углевмещающей толщи Западного района Донбасса. Анализ распределения касательных напряжений τ_{xy} при проскальзывании породных слоев наиболее наглядно иллюстрируется «тонкослойной» (рис. 4.4) моделью I и «крупнослойной» моделью II (рис. 4.5) при $H = 200$ м. Общей чертой влияния проскальзывания слоев является увеличение максимумов τ_{xy} на практически постоянную величину в 1,64...1,77 раза

вне зависимости от структуры углевещающей толщи и деформационных свойств слагающих породных слоев. Причем, область распространения повышенных τ_{xy} остается почти неизменной (рост не более, чем на 5...10%) в сравнении с ненарушенным контактом между слоями.

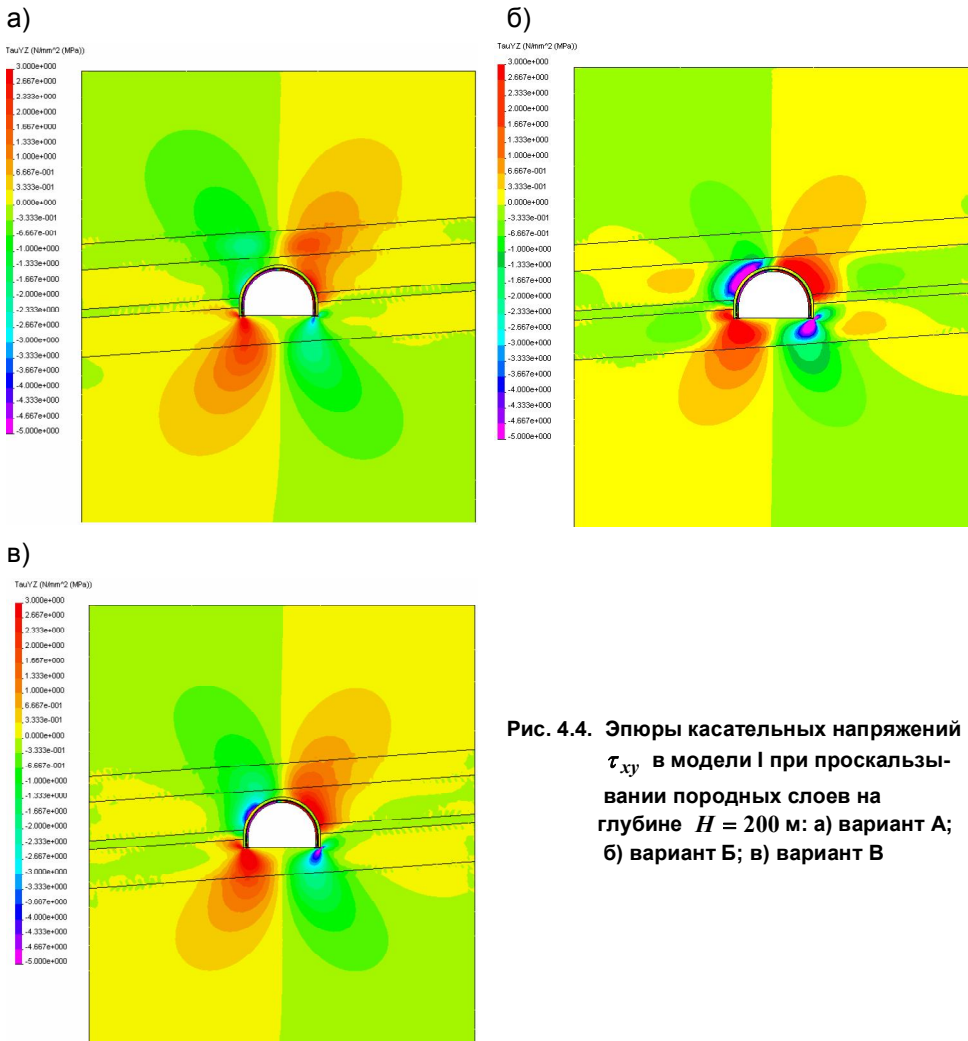


Рис. 4.4. Эпюры касательных напряжений τ_{xy} в модели I при проскальзывании породных слоев на глубине $H = 200$ м: а) вариант А; б) вариант Б; в) вариант В

Примечательным является факт распределения τ_{xy} по мощности каждого породного слоя с максимумом посередине и минимумом на их поверхностях, что согласуется с классическими решениями [151], в то время как для

однородной модели (см. рис. 4.4, в) происходит довольно плавное изменение τ_{xy} при пересечении соседних слоев. Очевидно, проскальзывание соседних слоев друг относительно друга в окрестности выработки усиливает проявления горного давления и учет этого явления в геомеханических моделях объективно необходим.

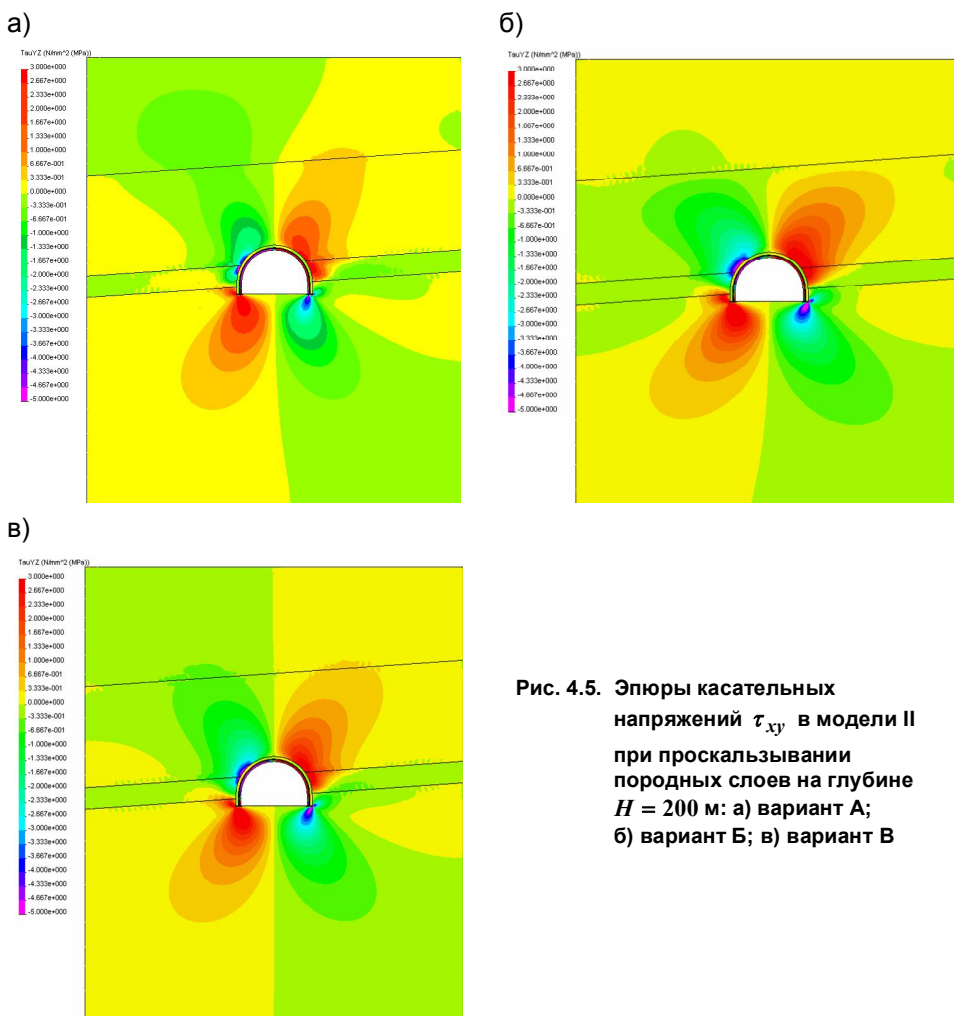
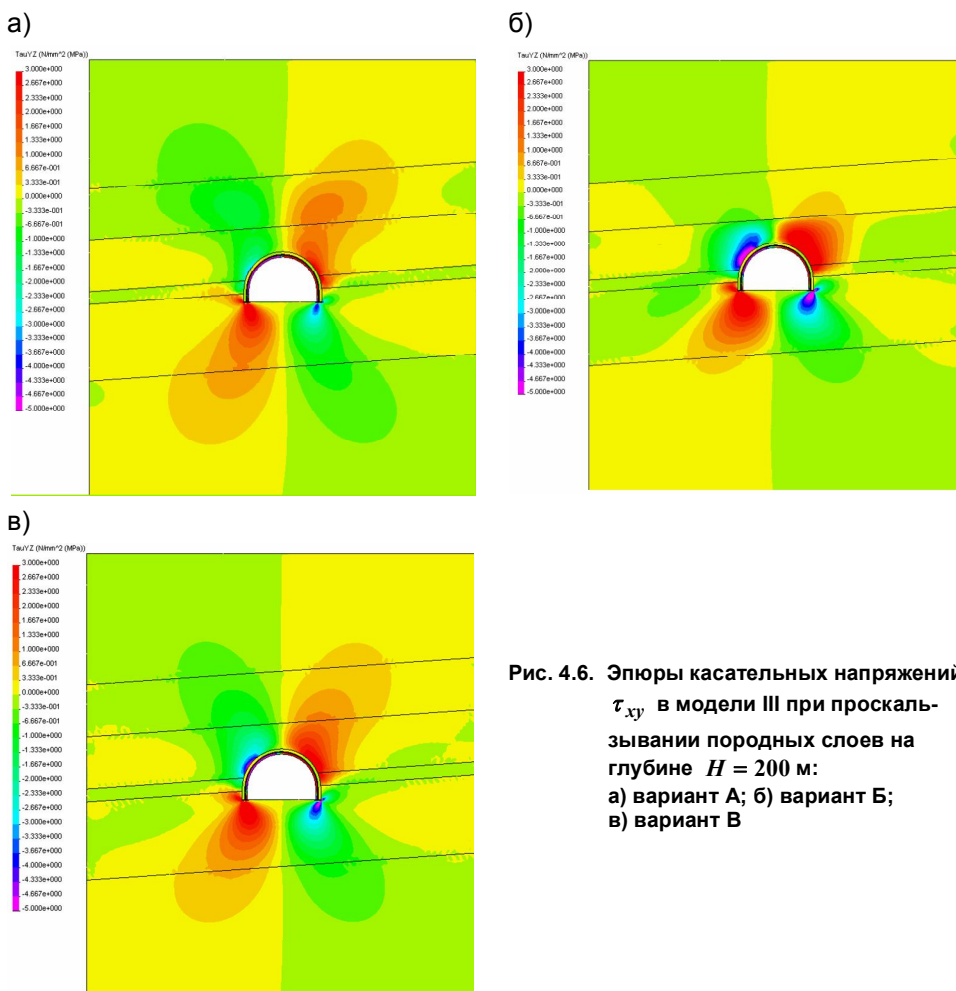


Рис. 4.5. Эпюры касательных напряжений τ_{xy} в модели II при проскальзывании породных слоев на глубине $H = 200$ м: а) вариант А; б) вариант Б; в) вариант В

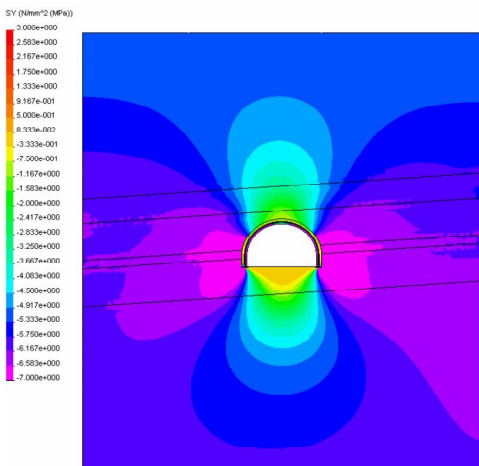
Сравнение трех моделей (см. рис. 4.3) по величине касательных напряжений проведено по значениям максимумов τ_{xy} , разница между которыми наиболее существенна, чем в остальных областях моделей. Отмечено, что максимумы τ_{xy} существенно зависят от соотношений деформационных характе-

ристик слоев, причем наивысшие значения максимумов приобретают разные модели (при изменении $E_i^{K,II}$), что требует более детального анализа. Наиболее «разнополюсные» модели I и II имеют наибольшие отклонения максимумов τ_{xy} : от 7,0 до 17,6% для варианта А, от 18,6 до 19,5% для варианта Б и от 1,7 до 7,8% для варианта В. Сравнение моделей I и III (рис. 4.6) дает следующие отклонения максимумов τ_{xy} : от 4,7 до 12,6% для варианта А, от 9,8 до 11,6% для варианта Б и от 0 до 4,9% для варианта В. При сравнении максимумов τ_{xy} моделей II и III получены такие результаты: от 2,2 до 4,3% для варианта А, от 8,6 до 11,2% для варианта Б и от 1,7 до 3,4% для варианта В.

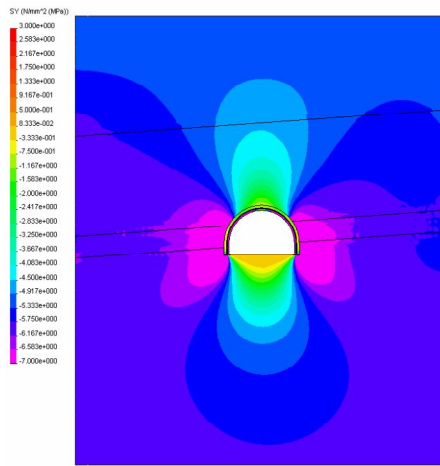


Таким образом, если в качестве базовой принять модель III, то большинство отклонений максимумов τ_{xy} попадают в интервал до 10%, который считается вполне допустимым при горнотехнических расчетах. Еще больше преимуществ модели III дает тот факт, что отклонения τ_{xy} в немаксимальных областях существенно меньше.

а)



б)



в)

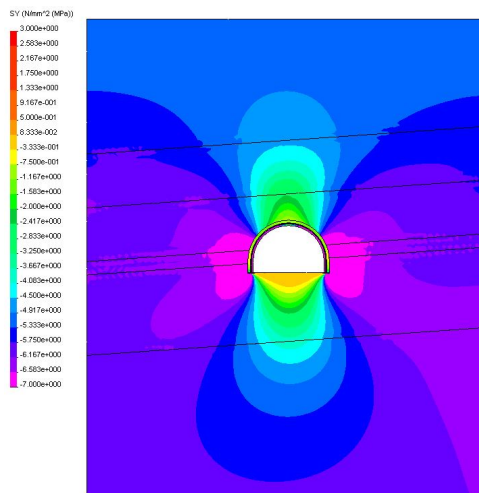


Рис. 4.7. Эпюры вертикальных напряжений σ_y (вариант А) при проскальзывании породных слоев на глубине $H = 200$ м: а) модель I; б) модель II; в) модель III

Рассмотрено также распределение вертикальных напряжений σ_y в трех моделях структуры углевмещающей толщи пород. На рис. 4.7 приведены

эпюры σ_y трех моделей при повышенной деформативности породных слоев непосредственной кровли и почвы. Независимо от структуры пород углевмещающей толщи в кровле и почве выработки имеется зона разгрузки, что согласуется с известными решениями [136, 137, 140, 143]. Размеры этих зон при $H = 200$ м в кровле выработки достаточно стабильны и достигают по высоте $(2...2,2)r_g$, по ширине $(1,7...1,8)r_g$. В почве выработки зона разгрузки более обширна и составляет $(3...3,2)r_g$ по глубине и $(2,8...3,1)r_g$ по ширине. В приконтурных породах кровли и почвы возникают растягивающие напряжения $\sigma_y = (1...3)$ МПа, что приводит к их частичному или полному разрушению и формированию области неустойчивых пород. В боках выработки на ширину до $(0,5...0,7)r_g$ имеется концентрация сжимающих напряжений σ_y , которая в приконтурных породах достигает $(2...2,7)\gamma H$, что также способствует появлению в боках выработки области неустойчивых пород. Очевидно, что с увеличением глубины расположения выработки область неустойчивых пород в ее окрестности будет расширяться. Более детально этот вопрос исследован в последующих разделах.

Сравнение эпюр σ_y для разных структур углевмещающей толщи дает такие результаты (см. рис. 4.7).

Во-первых, размеры области опорного давления и разгрузки отличаются для разных моделей не более, чем на 6,7%.

Во-вторых, растягивающие напряжения в кровле и почве на соответствующих участках области разгрузки различаются по величине не более, чем на 13,1%.

В-третьих, максимальные сжимающие напряжения σ_y в боках выработки наблюдаются для модели II, величина которых превышает σ_y для модели III на 12,2%, а для модели I – на 27,0%. Однако размеры области действия этих максимумов σ_y вблизи контура выработки невелики, всего $(0,06...0,08)r_g$, и не оказывают решающего значения в общей картине поля напряжений σ_y .

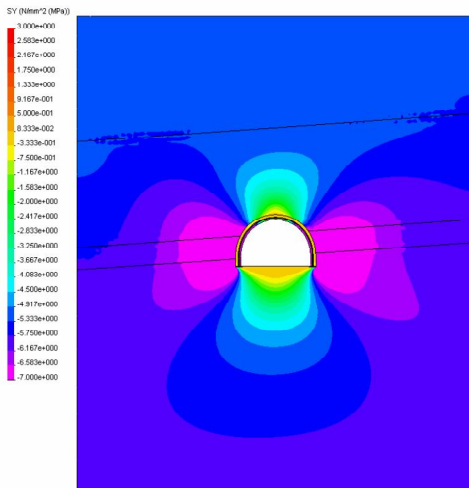
В-четвертых, максимальные напряжения σ_y стабильно располагаются в опорах стойки рамы, что имеет свое логическое обоснование в части аккумуляции опорного давления наиболее жесткой частью модели. В этой связи в сечении стойки рамы преобладают сжимающие напряжения σ_y , которые в 6,4...7,2 раза превосходят растягивающие и достигают величины $\sigma = (357...398)$ МПа, находящейся за пределом текучести стали Ст.5 (из которой изготавливается рамная крепь из спецпрофиля СВП). Этот факт указывает на потерю устойчивости рамной крепи уже на глубине $H = 200$ м.

В-пятых, максимумы σ_y в стойках рамы имеют достаточно стабильное

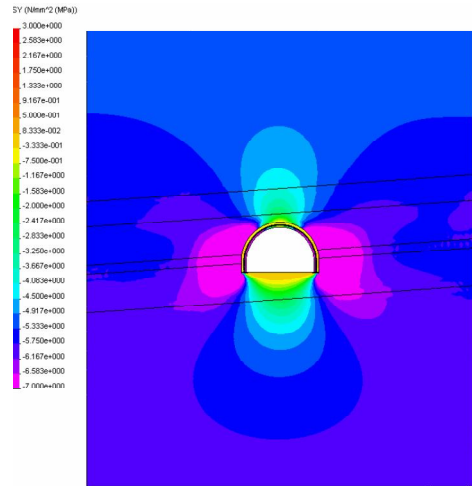
значение для разных моделей: отклонение σ_y в модели I по отношению к модели III составляет 8,5%, а в модели II – 2,1%.

Таким образом, по результатам анализа поля напряжений σ_y можно сделать вывод об универсальности модели III для описания структуры углевмещающей толщи пород при повышенной их деформативности в слоях непосредственной кровли и почвы.

а)



б)



в)

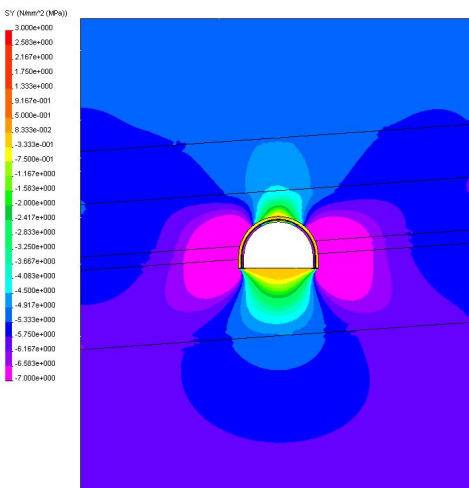
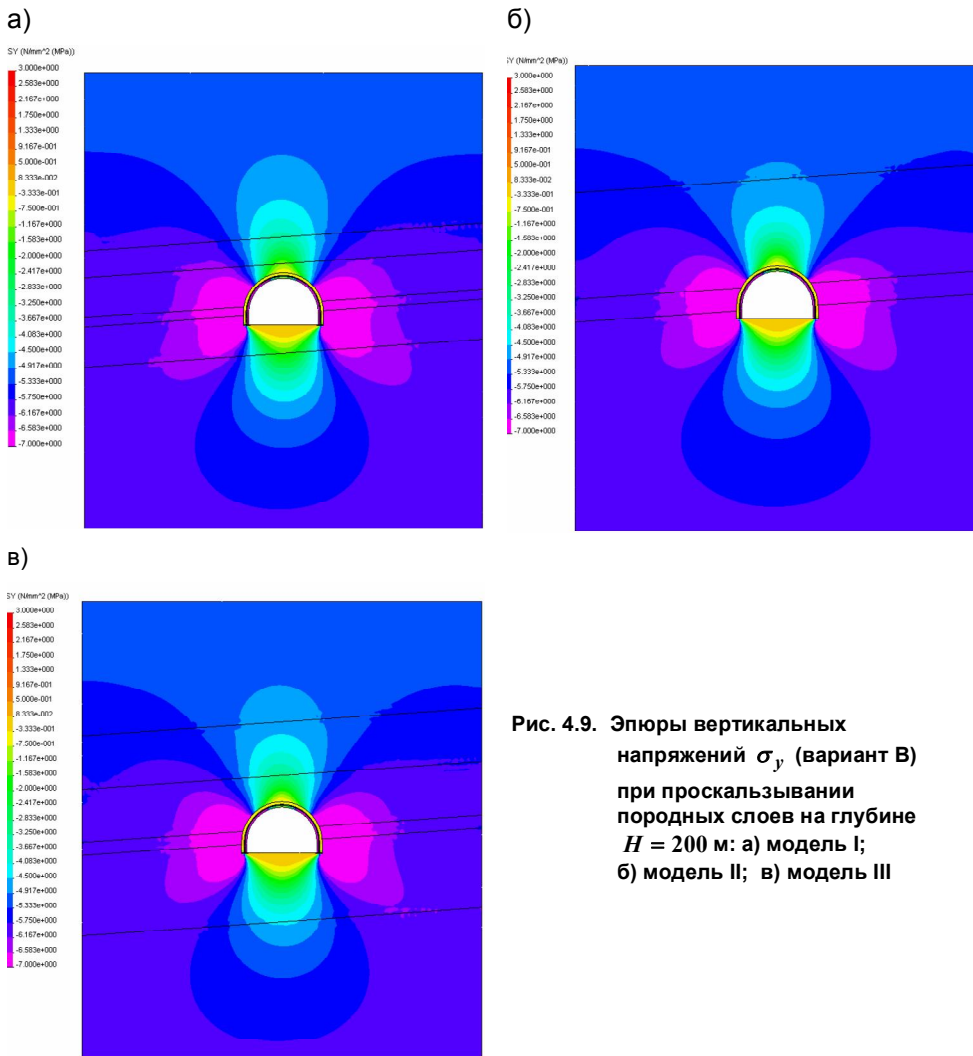


Рис. 4.8. Эпюры вертикальных напряжений σ_y (вариант Б) при проскальзывании породных слоев на глубине $H = 200$ м: а) модель I; б) модель II; в) модель III



Для полноты анализа поля вертикальных напряжений σ_y расчет НДС исследуемых трех моделей был произведен при повышенной жесткости породных слоев непосредственной кровли и почвы по варианту Б (рис. 4.8) и при однородном слоистом массиве по варианту В (рис. 4.9). Общими особенностями распределения σ_y для вариантов Б и В (аналогичным варианту А) для всех трех моделей являются: относительно небольшие до 10% колебания размеров областей опорного давления и разгрузки (исключение вариант Б модели II); разница максимумов растягивающих напряже-

ний в зоне разгрузки не превышает 15%, а максимумов сжимающих напряжений в зоне опорного давления – 29,7%; но эти максимумы имеют весьма ограниченную область действия; относительно небольшие колебания максимумов σ_y в опорах стойки рамы – до 14,7%.

Отличительными чертами являются:

- существенное снижение высоты областей разгрузки в кровле в 1,40...2,36 раза (для варианта Б по сравнению с вариантом А) и в 1,09...1,20 раза (для варианта В по отношению к варианту А);

- незначительное уменьшение глубины областей разгрузки в почве выработки: на 9,6...14,3% для варианта Б и на 5,3...7,7% для варианта В;

- практически стабильные размеры области опорного давления для всех вариантов моделей I и III;

- повышенные сжимающие напряжения σ_y в боках выработки (особенно для варианта Б), что обусловлено увеличенной жесткостью породных слоев непосредственной кровли и почвы;

- пониженные значения (в сравнении с вариантом А) максимумов σ_y в опорах стойки рамы: в 2,70...3,86 раза для варианта Б и в 1,92...2,26 раза для варианта В.

В итоге, анализ поля распределения вертикальных напряжений σ_y позволил сформулировать два вывода. Во-первых, модель III с достаточной для горнотехнических расчетов точностью позволяет описать структуру углевмещающей толщи рабочих угольных пластов Западного Донбасса. Во-вторых, механические характеристики породных слоев существенно влияют на величину σ_y в различных элементах модели.

Аналогично вертикальным напряжениям σ_y проанализированы поля горизонтальных напряжений σ_x во всех трех моделях (см. рис. 4.3) структуры углевмещающей толщи при различных сочетаниях механических характеристик пород (см. табл. 4.1). На рис. 4.10 приведены эпюры σ_x в моделях I, II и III при сочетании механических характеристик слоев по варианту А. Наиболее наглядно проявляются напряжения σ_x от действия изгибающих моментов в каждом слое в окрестности выработки. В соответствии с классическими представлениями прогибы слоев порождают дополнительные горизонтальные напряжения σ_x :

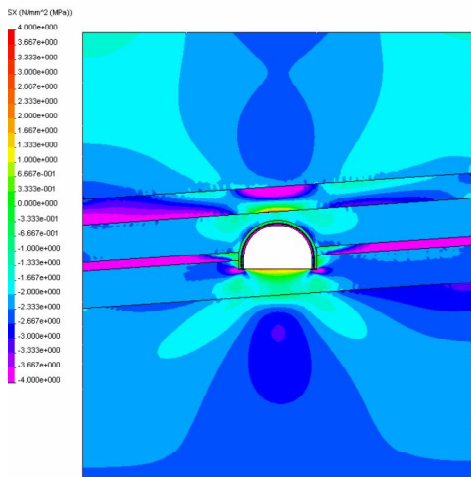
- в кровле выработки растягивающие напряжения σ_x появляются в нижних слоях, а сжимающие σ_x – в верхних слоях, как это и должно быть при смещении пород кровли в полость выработки;

- в почве выработки растягивающие напряжения появляются в верхних слоях, что указывает на перемещение пород почвы в полость выработки;

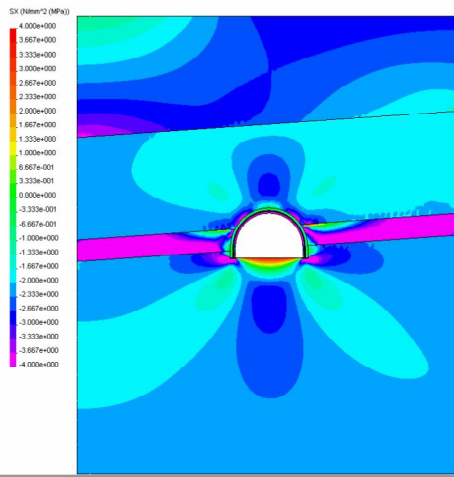
- в боках выработки четко выражена зона опорного давления, в которой

меняется знак кривизны изгиба слоев: непосредственно на контакте с выработкой растяжение происходит в нижних слоях, на расстоянии $(1...2)r_6$ растяжение наблюдается в верхних слоях.

а)



б)



в)

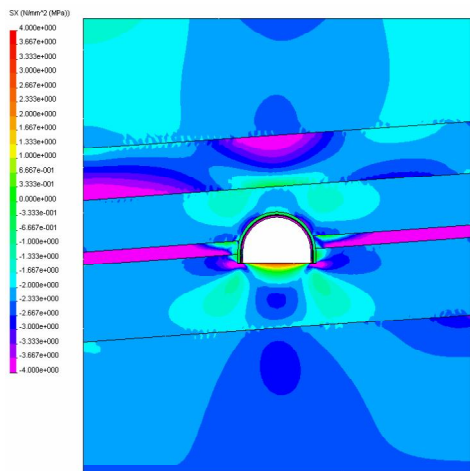
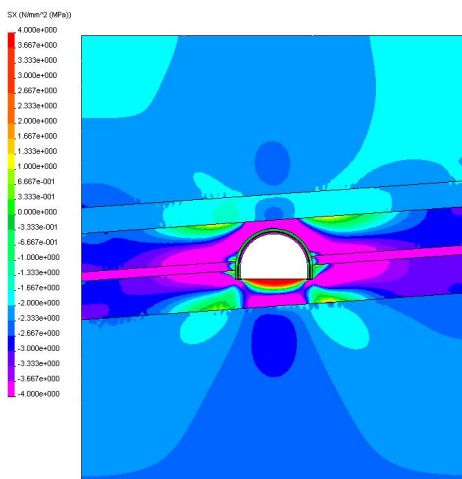


Рис. 4.10. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x (вариант А) при проскальзывании породных слоев на глубине $H = 200$ м: а) модель I; б) модель II; в) модель III

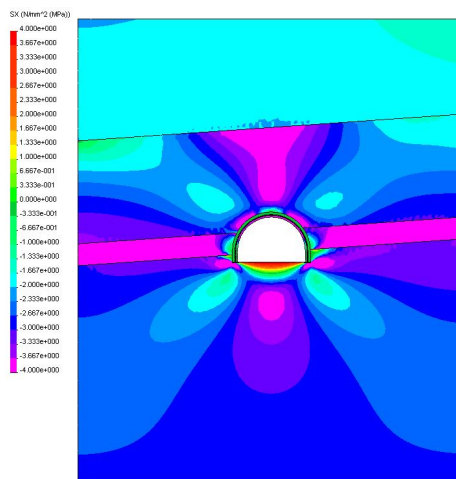
По причине отмеченных особенностей деформирования слоев величина горизонтальных напряжений σ_x очень сильно зависит от их мощности [151] в зоне действия максимальных изгибающих моментов. Поэтому в рассматриваемых моделях, существенно отличающихся по мощности породных

слоев, величина σ_x будет различна: в более мощных – меньше, в более тонких – выше. Таким образом, горизонтальные напряжения σ_x являются единственной компонентой, имеющей значительные различия в трех исследуемых моделях. Однако при более детальном сравнении полей σ_x по отдельным областям моделей можно выявить достаточно сходных черт не только в качественном, но и в количественном плане.

а)



б)



в)

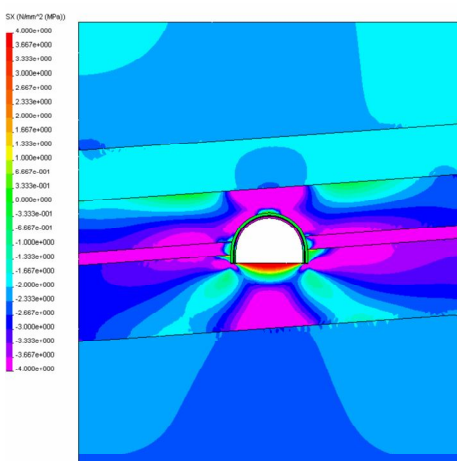


Рис. 4.11. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x (вариант Б) при проскальзывании породных слоев на глубине $H = 200$ м: а) модель I; б) модель II; в) модель III

Во-первых, в почве выработки растягивающие напряжения σ_x распространяются на глубину до $(0,45...0,5)r_g$ и разница в размерах этих областей не превышает 20%.

Во-вторых, в почве выработки на глубине $(0,7...1,1)r_g$ располагается ядро сжатия, величина σ_x в котором составляет $(1,34...1,56)\lambda\gamma H$ и максимальные отклонения для разных моделей не превышают 16,7%.

В-третьих, в породном пласте непосредственной кровли на высоте $(0,2...0,5)r_g$ действия растягивающих напряжений различие компоненты σ_x находится в пределах 7...20%.

В-четвертых, в угольном пласте, несмотря на различия в размерах зоны действия растягивающих напряжений σ_x , оцениваемой $(0,6...1,1)r_g$, (максимальный размер соответствует модели II), их значения разнятся в пределах до 20%.

В-пятых, в районе опор стоек рамной крепи сжимающие напряжения σ_x достаточно стабильны с относительно постоянной зоной их распространения в $(0,46...0,69)r_g$.

В-шестых, в самой рамной крепи максимумы растягивающих и сжимающих напряжений σ_x для разных моделей имеют незначительные отклонения в пределах от 4,1 до 13,6%.

Такая достаточная стабильность поля напряжений σ_x при различной структуре углевмещающих пород объясняется учетом совместности деформирования слоев пород, слагающих толщу, при котором влияние мощности отдельного слоя заметно снижается.

Для оценки влияния механических характеристик слоев моделей проведен расчет поля напряжений σ_x для варианта Б (рис. 4.11) и варианта В (рис. 4.12). Анализ распределения σ_x показывает их тесную связь с модулем деформации породного слоя и их соотношением между соседними слоями. Величина напряжений σ_x изменяется в несколько раз на одних и тех же участках модели и поле напряжений существенно преобразуется. Чем выше модуль деформации рассматриваемого слоя в сравнении с соседними, тем больше величина σ_x : более жесткий элемент воспринимает на себя большую нагрузку. Это тем более объясняет снижение максимумов компоненты σ_x в рамной крепи в 2,63...3,95 раза при повышенной жесткости породных слоев непосредственной кровли и почвы. Однако, как и в варианте А, в вариантах Б и В разница максимумов компоненты σ_x в разных моделях относительно невелика и составляет от 4,4 до 17,8% (для варианта Б) и от 0,3 до 8,6% (для варианта В).

Таким образом, по результатам анализа поля распределения компоненты σ_x можно сделать вывод о допустимости усреднения структуры углевмещающей толщи пород в соответствии с моделью III.

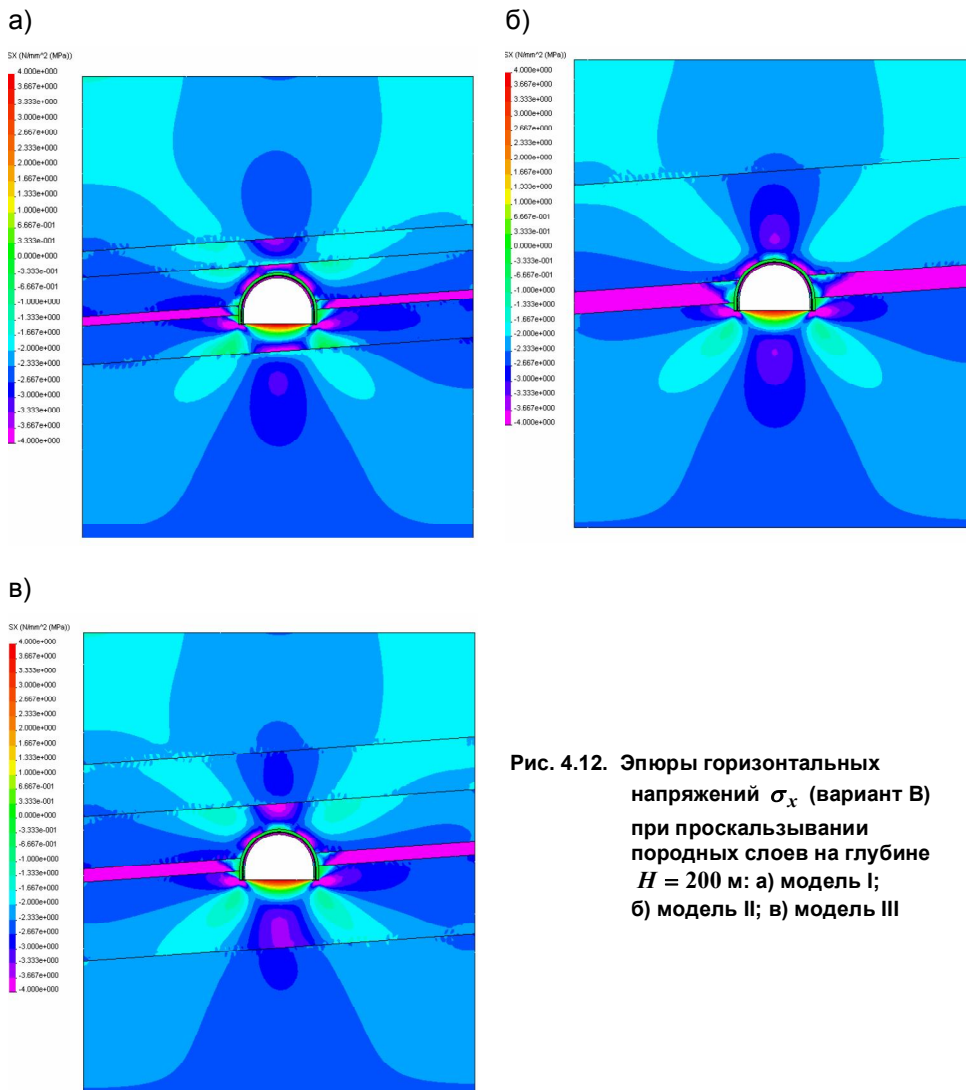


Рис. 4.12. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x (вариант В) при проскальзывании породных слоев на глубине $H = 200$ м: а) модель I; б) модель II; в) модель III

На заключительном этапе данного исследования проанализировано поле распределения приведенного напряжения σ , являющегося интегральным показателем интенсивности действия всех компонент (σ_y , σ_x и τ_{xy}) в соответствии с выбранной теорией прочности по выражению (4.2). На рис. 4.13 приведены эпюры σ для трех моделей I, II и III при соотношении механических характеристик слоев по варианту А. Вполне логично зоны разгрузки располагаются в

кровле и почве выработки, а зоны опорного давления – в ее боках. Также очевидно, что в «крупнослоистой» модели II зоны разгрузки будут минимальными, а зоны опорного давления – максимальными; в «мелкослоистой» модели I наблюдается обратная картина, когда породные слои непосредственной кровли и почвы имеют пониженную жесткость в сравнении с остальными слоями.

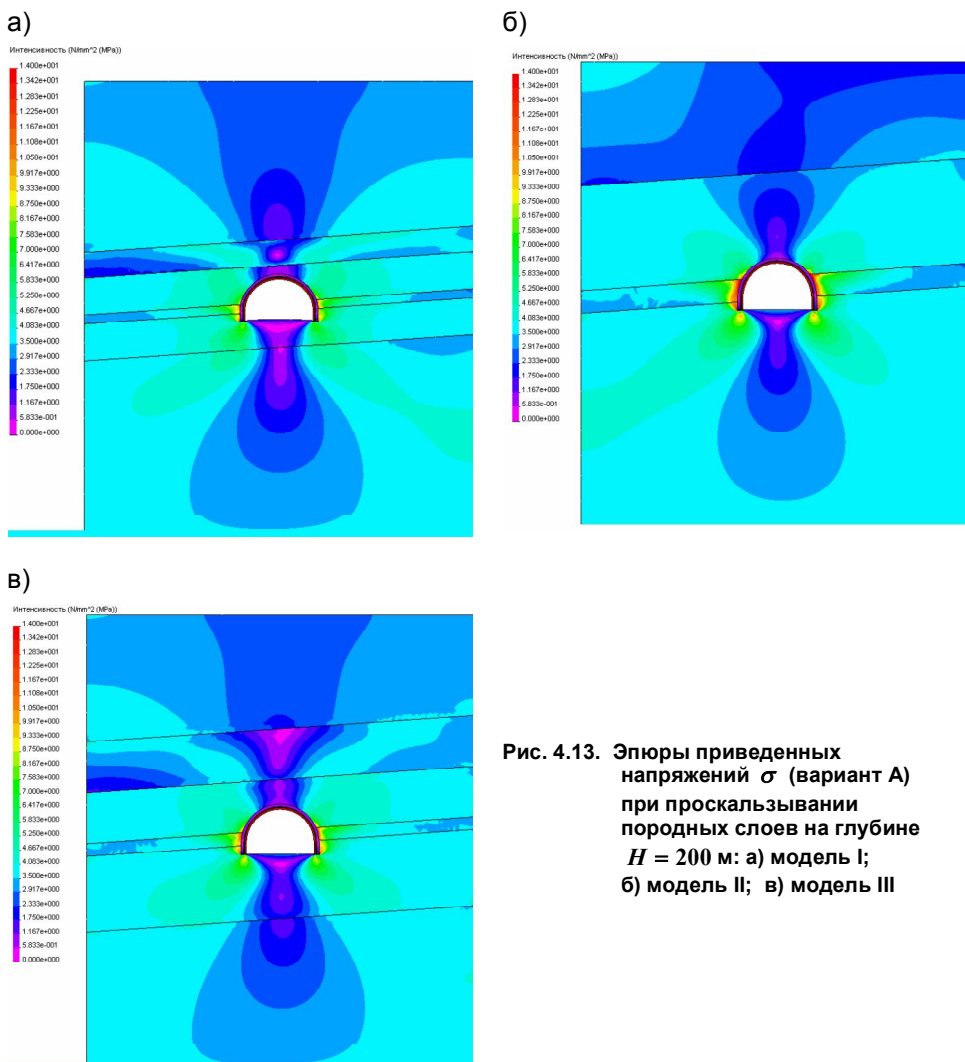
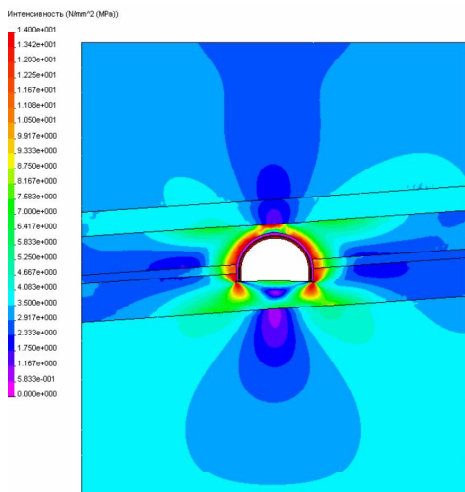


Рис. 4.13. Эпюры приведенных напряжений σ (вариант А) при проскальзывании породных слоев на глубине $H = 200$ м: а) модель I; б) модель II; в) модель III

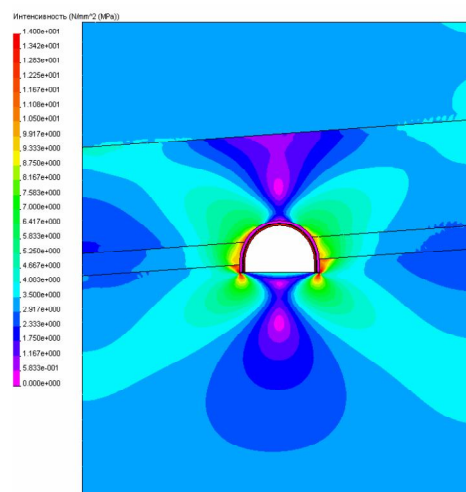
Повышенная жесткость (вариант Б) породных слоев непосредственной кровли и почвы угольного пласта приводит к противоположному результату

(рис. 4.14), а однородный массив (вариант В) занимает промежуточное положение (рис. 4.15). Таким образом, соотношение механических характеристик породных слоев углевмещающей толщи оказывает решающее влияние на эпюру распределения σ , что вполне естественно, поскольку аналогичные тенденции имели место при анализе компонент σ_y , σ_x и τ_{xy} .

а)



б)



в)

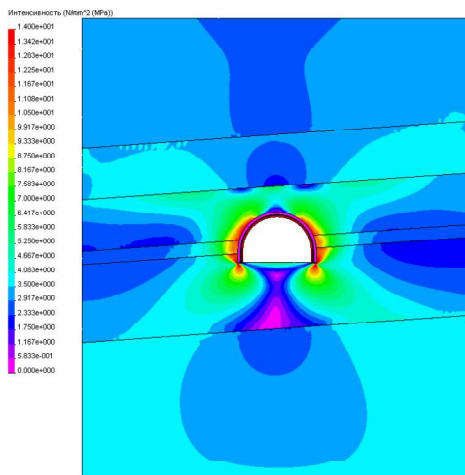
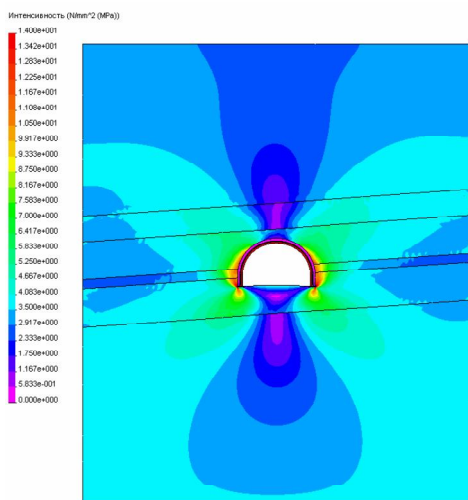


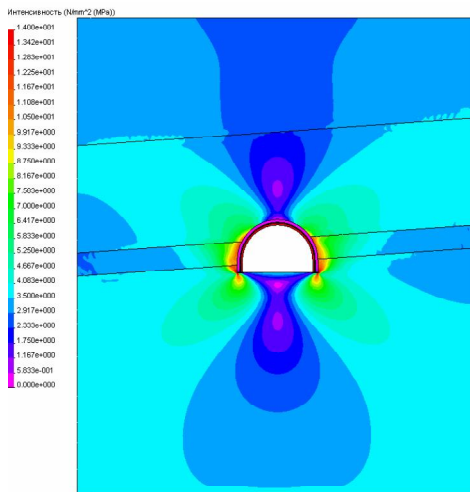
Рис. 4.14. Эпюры приведенных напряжений σ (вариант Б) при проскальзывании породных слоев на глубине $H = 200$ м: а) модель I; б) модель II; в) модель III

Обращают внимание размеры зон разгрузки и опорного давления во всех трех моделях при различных вариантах (А, Б и В) и сочетания механических характеристик породных слоев: уже на глубине $H = 200$ м они составляют $(1,5...3)r_{\text{г}}$ и это означает возможность разрушения значительного объема пород вокруг штрека при переходе на более глубокие горизонты.

а)



б)



в)

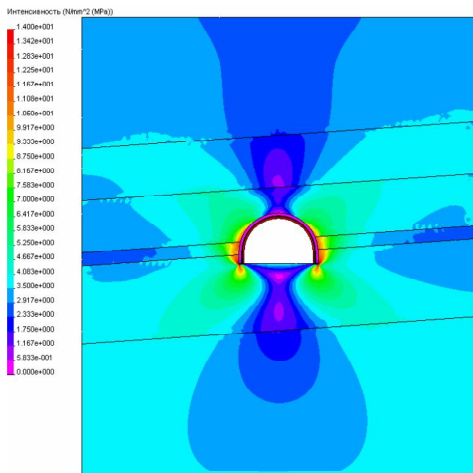


Рис. 4.15. Эпюры приведенных напряжений σ (вариант В) при проскальзывании породных слоев на глубине $H = 200$ м: а) модель I; б) модель II; в) модель III

Особенно важно, что глубина зоны разгрузки в почве штока достигает 5...8 м (при $H = 200$ м), что значительно превышает общепринятую глубину анкерования в 1,5...2,5 м. Поэтому целесообразно, на наш взгляд, в данных горно-геологических условиях выбирать параметры анкеров на основе оптимизации поля напряжений как в заанкерванной почве, так и в близлежащем к ней породном массиве.

Второй вывод заключается в необходимости учета изменения механических характеристик породного массива в запредельном состоянии в зонах опорного давления и разгрузки. Для этого необходимо установить связь размеров зон с горно-геологическими и горнотехническими условиями поддержания пластовых штоков.

Третий вывод – уже на глубине $H = 200$ м максимумы приведенных напряжений σ в рамной крепи нередко превышают предел текучести стали Ст.5, что указывает на появление пластических шарниров, потерю устойчивой формы крепи и, как следствие, разрушение выработки.

5. ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОДНЫХ СЛОЕВ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ «МАССИВ-КРЕПЬ»

5.1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Предыдущими исследованиями установлен факт значительного влияния деформационных характеристик близлежащих к выработке слоев пород на все без исключения компоненты напряжений. Поэтому обязательным этапом является расчет НДС и его анализ на предмет выявления закономерностей влияния деформационных характеристик слоев углевмещающей толщи на поле напряжений в системе «массив-крепь». Геомеханическая модель системы включает угольный пласт, два породных слоя в почве пластового штрека и три породных слоя в его кровле. Такая сложная структура модели предполагает большое количество переменных деформационных характеристик слагающих ее элементов и, соответственно, значительный объем вычислений и трудности анализа их результатов. Поэтому для снижения количества переменных параметров, не снижая общности получаемых результатов, принят ряд дополнительных упрощений.

Во-первых, механические характеристики рабочих угольных пластов в Западном Донбассе достаточно стабильны [144-146, 155] и поэтому усреднены значениями: $E^y = 0,35 \cdot 10^4$ МПа, $\mu^y = 0,35$, $\varphi^y = 30^\circ$.

Во-вторых, при обосновании структуры углевмещающей толщи модели было установлено, что в крайних слоях почвы ($m_2^П$) и кровли (m_3^K) пластового штрека НДС характеризуется достаточным постоянством без существенных концентраций компонент. Также выявлено незначительное влияние на НДС близлежащих к штреку породных слоев и рамной крепи колебаний механических характеристик крайних слоев модели, что обосновывает возможность их усреднения для наиболее распространенных углевмещающих пород Западного Донбасса (аргиллитов и алевролитов): $E_2^П = E_3^K = 0,3 \cdot 10^4$ МПа; $\mu_2^П = \mu_3^K = 0,25$; $\varphi_2^П = \varphi_3^K = 30^\circ$.

В-третьих, для всех породных слоев углевмещающей толщи Западного Донбасса согласно данным [144-146, 155] принято усредненное значение коэффициента Пуассона $\mu_i^{П,K} = 0,25$ и угла внутреннего трения $\varphi_i^{П,K} = 30^\circ$.

Таким образом, в проведенных исследованиях переменными параметрами были модули деформации: первого слоя почвы $E_1^П$, первого E_1^K и второго E_2^K слоев кровли с диапазоном их изменения в пределах

$0,3 \cdot 10^4 \leq E_i^{П,К} \leq 1 \cdot 10^4$ МПа. Однако, даже при указанных ограничениях получен достаточно обширный перебор вариантов соотношений деформационных характеристик близлежащих породных слоев, который приведен в таблице 3.1. Здесь для каждого слоя просчитаны крайние значения ($0,3 \cdot 10^4$ МПа и $1 \cdot 10^4$ МПа) и промежуточное значение ($0,6 \cdot 10^4$ МПа).

Иллюстрация полей напряжений в системе «массив-крепь» выполнена при $\gamma H = 10$ МПа ($H = 400$ м). Но, расчеты произведены также для глубин $H = 200$ м и $H = 600$ м. Таким образом, всего был выполнен 81 расчет НДС системы.

5.2. ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД КРОВЛИ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ

Рассмотрено изменение компонент σ_y и σ_x в кровле выработки в зависимости от соотношения деформационных характеристик близлежащих слоев. Варианты №1 и №18 (см. табл. 5.1) имеют однородные деформационные характеристики всех трех близлежащих слоев, но в варианте №18 величина модуля деформации в 3,33 раза выше. Это способствует сокращению области разгрузки ($\sigma_y \approx 0,5\gamma H$) как по высоте, так и по ее ширине (рис. 5.1). Однако, если брать область разгрузки по условию появления растягивающих напряжений ($\sigma_y = 0$), то ее размеры остаются примерно одинаковы в обоих вариантах и составляют порядка $1,4 r_g$ по высоте. На контуре выработки растягивающие напряжения достигают $\sigma_y = 6 \dots 8$ МПа. Здесь следует отметить, что слабые породы Западного Донбасса с учетом ослабляющих факторов практически не сопротивляются растягивающим напряжениям.

Когда первый слой кровли имеет повышенную жесткость (вариант №3), то высота зоны разгрузки ($\sigma_y = 0$) снижается до $1,12 r_g$ (рис. 5.2, а), а при повышенной жесткости второго слоя кровли (вариант №10) высота увеличивается до $1,58 r_g$ (см. рис. 5.2, б). При повышенной жесткости обоих породных слоев кровли (вариант №14) высота зоны разгрузки снижается всего до $1,4 r_g$ (рис. 5.3, а).

Таким образом, независимо от соотношений модуля деформаций близлежащих к выработке породных слоев (в пределах от $0,3 \cdot 10^4$ МПа до $1 \cdot 10^4$ МПа, характерных для Западного Донбасса), высота зоны разгрузки довольно стабильна на уровне $(1,4 \dots 1,5) r_g$. Исключение составляет лишь вариант №7 расположения жестких пластов одновременно в непосредственной кровле и почве, когда высота зоны разгрузки достигает $2,14 r_g$ (см. рис. 5.3, б).

Таблица 5.1

**ВАРИАНТЫ СООТНОШЕНИЯ МОДУЛЕЙ ДЕФОРМАЦИИ
БЛИЗЛЕЖАЩИХ ПОРОДНЫХ СЛОЕВ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕЙ ТОЛЩИ**

Вариант	$E_1^H \cdot 10^4$ МПа	$E_1^K \cdot 10^4$ МПа	$E_2^K \cdot 10^4$ МПа	Вариант	$E_1^H \cdot 10^4$ МПа	$E_1^K \cdot 10^4$ МПа	$E_2^K \cdot 10^4$ МПа	Вариант	$E_1^H \cdot 10^4$ МПа	$E_1^K \cdot 10^4$ МПа	$E_2^K \cdot 10^4$ МПа
1	0,3	0,3	0,3	10	0,3	0,3	1	19	0,3	1	0,6
2	0,3	0,6	0,3	11	0,6	0,3	1	20	0,6	1	0,6
3	0,3	1	0,3	12	0,6	0,6	1	21	1	1	0,6
4	0,6	0,6	0,3	13	0,3	0,6	1	22	0,3	0,3	0,6
5	1	0,6	0,3	14	0,3	1	1	23	0,6	0,3	0,6
6	0,6	1	0,3	15	0,6	1	1	24	1	0,3	0,6
7	1	1	0,3	16	1	0,3	1	25	0,3	0,6	0,6
8	1	0,3	0,3	17	1	0,6	1	26	0,6	0,6	0,6
9	0,6	0,3	0,3	18	1	1	1	27	1	0,6	0,6

Проанализированы также особенности распределения горизонтальных напряжений σ_x в кровле выработки. Во всех рассмотренных вариантах слои в кровле прогибаются над выработкой с образованием повышенных сжимающих напряжений σ_x в верхних частях слоя, а в первом породном слое в нижних частях появляются растягивающие σ_x . В нижних частях второго породного слоя имеют место пониженные сжимающие напряжения σ_x , которые провоцируют увеличение зоны разгрузки напряжений σ_y , что тождественно зоне предельного состояния горных пород в кровле выработки. С этой точки зрения интересно проследить соотношение компонент σ_x и σ_y для каждого из 27 вариантов. Оказалось, что по компоненте σ_x наблюдается обратная картина по отношению к σ_y , когда в зонах разгрузки σ_y пониженной высоты действуют повышенные сжимающие напряжения σ_x (во втором слое) и более интенсивно развивают эту зону (рис. 5.4-5.6). И, наоборот, в зонах разгрузки увеличенной высоты действуют (во втором породном слое) пониженные (даже растягивающие напряжения σ_x в варианте №7) напряжения σ_x , практически не развивающие зону предельного состояния пород кровли.

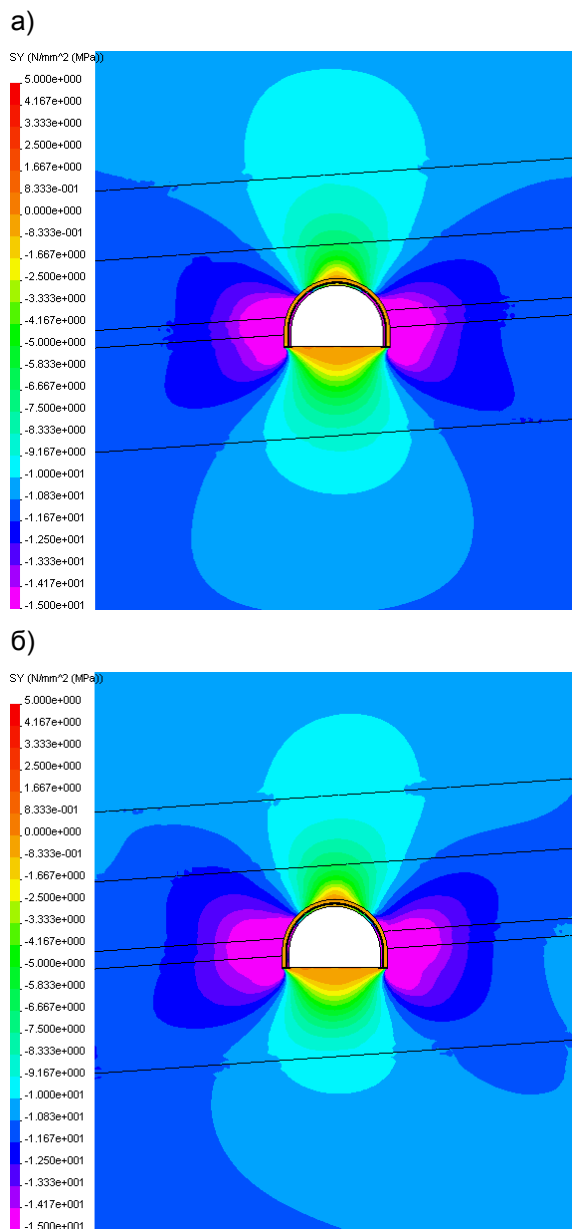
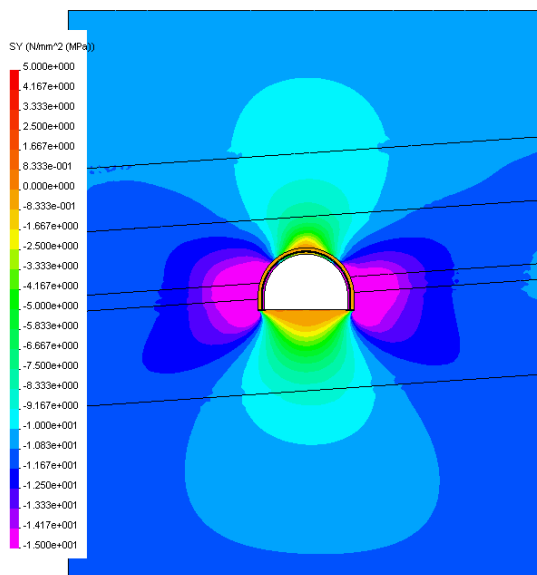


Рис. 5.1. Эпюры вертикальных напряжений σ_y в вариантах:
а) вариант №1; б) вариант №18

а)



б)

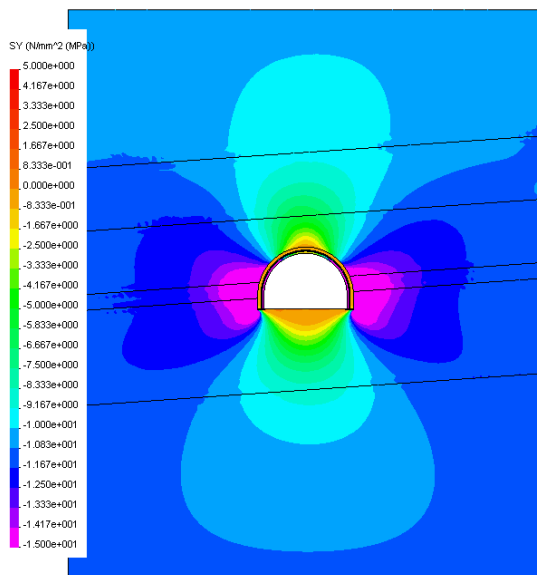
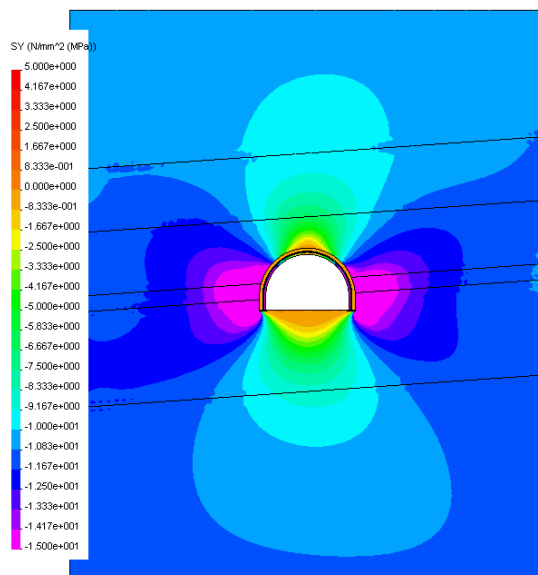


Рис. 5.2. Эпюры вертикальных напряжений σ_y в вариантах:
а) вариант №3; б) вариант №10

а)



б)

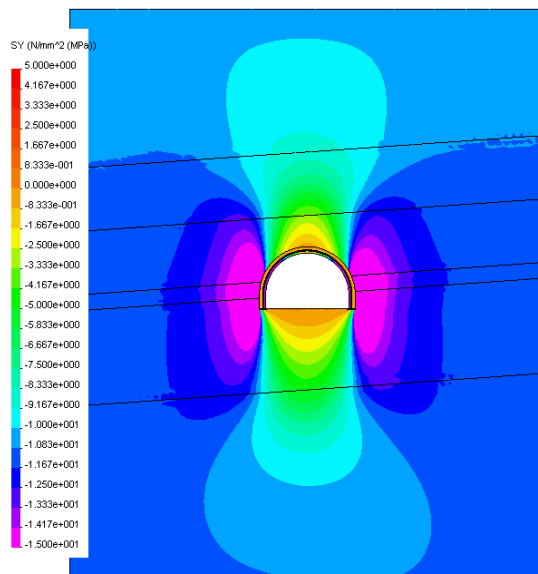


Рис. 5.3. Эпюры вертикальных напряжений σ_y в вариантах:
а) вариант №14; б) вариант №7

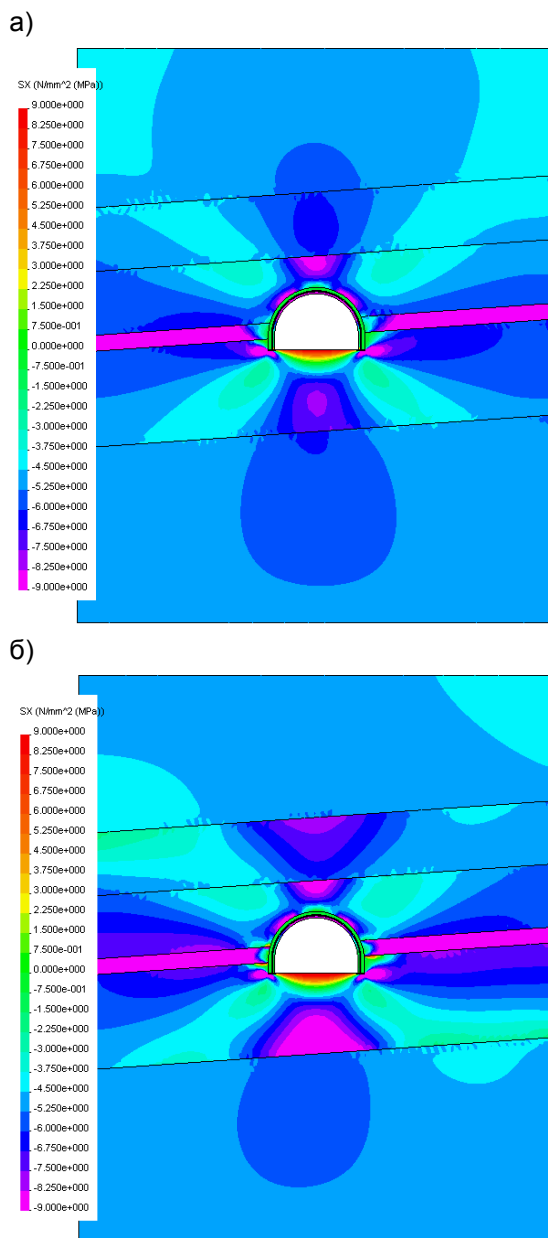
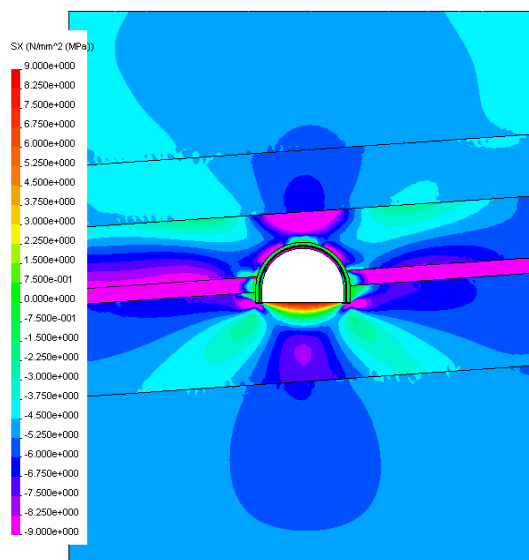


Рис. 5.4. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x в вариантах:
а) вариант №1; б) вариант №18

а)



б)

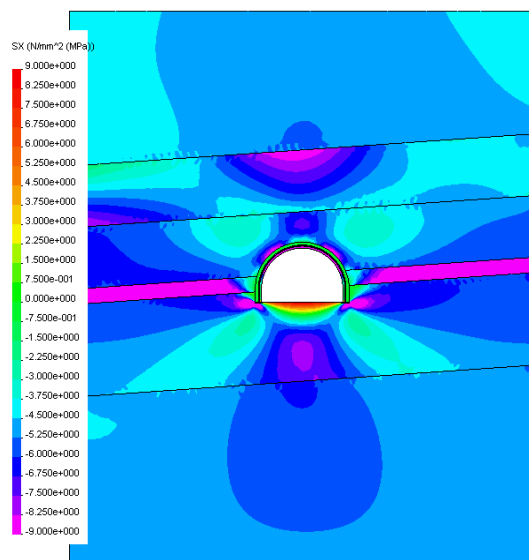


Рис. 5.5. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x в вариантах:
а) вариант №3; б) вариант №10

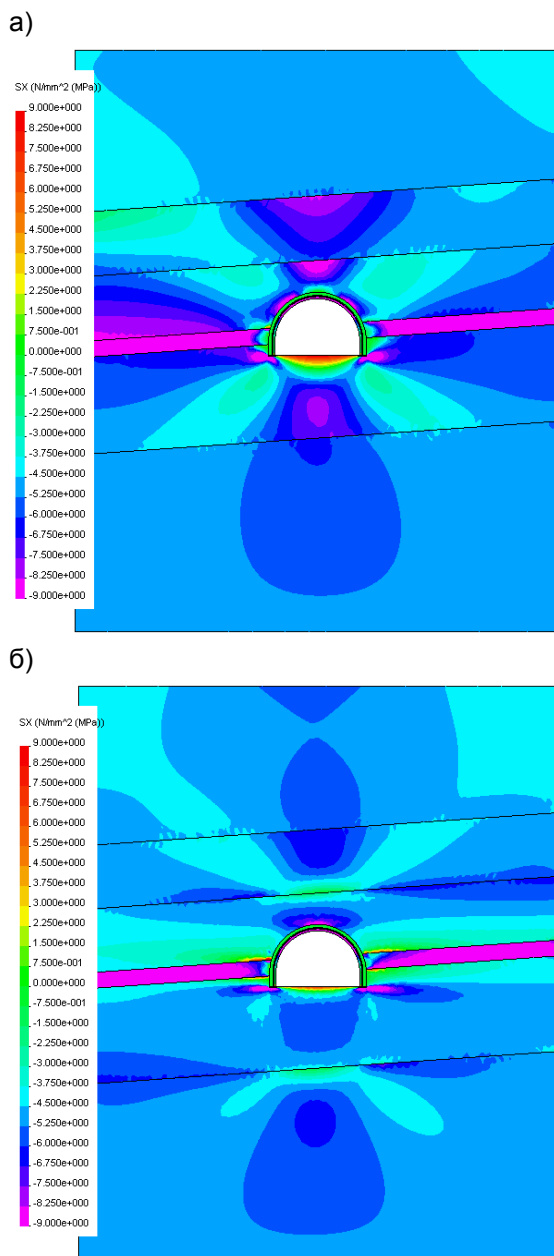


Рис. 5.6. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x в вариантах:
а) вариант №14; б) вариант №7

Таким образом, выявлен факт практически стабильной высоты зоны предельного состояния пород кровли, ограниченной плоскостью напластования второго и третьего породных слоев ($2,33 r_g$). Данная особенность использована при исследовании предельного состояния пород в окрестности пластовой выработки.

5.3. ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД В БОКАХ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ

Как было установлено ранее и подтверждено на рис. 5.1-5.3 в боках штрека образуется ярко выраженная зона опорного вертикального давления. Вблизи выработки (на глубине $H = 400$ м) величина σ_y превышает 25 МПа.

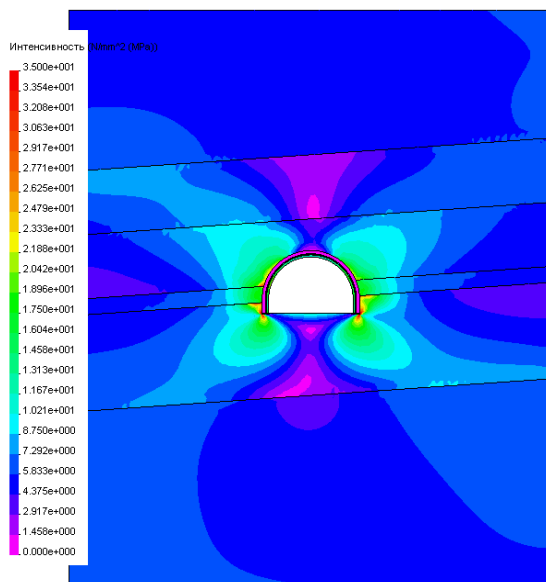
Если учесть диапазон (10...40 МПа) изменения для Западного Донбасса прочности породы на сжатие в образце [144-146, 155], а также снижение этого показателя в массиве в несколько раз из-за ряда ослабляющих факторов [156, 157], то становится очевидным, что в боках штрека образуется зона предельного состояния пород. Наиболее объективно оценивать предельное состояние массива от действия сжимающих напряжений следует по величине приведенных напряжений σ . Очевидно, что размеры зоны предельного состояния пород в боках штрека будут зависеть от их прочностных характеристик, но тенденции изменения ширины зоны от соотношений модулей деформации вмещающих слоев пород проследить возможно. Для этого выбрано условие $\sigma \geq 20$ МПа, которое отражает максимальную прочность пород Западного Донбасса с учетом минимального действия ослабляющих факторов. При иных условиях ширина зоны предельного состояния пород будет гораздо больше.

Эпюры распределения приведенного напряжения σ для наиболее представительных и «разнополюсных» соотношений модулей деформации близлежащих слоев пород приведены на рис. 5.7-5.10. При однородных деформационных характеристиках слоев независимо от их величины

ширина зоны предельного состояния породы постоянна и равна $0,56 r_g$ (см. рис. 5.7). При повышенной жесткости слоя почвы или второго слоя кровли ширина зоны составляет $(0,61...0,65) r_g$ (см. рис. 5.8).

Когда повышенной жесткостью обладают либо первый слой кровли, либо второй слой кровли и первый почвы, или одновременно оба слоя кровли интервал изменения ширины зоны предельного состояния несколько расширяется до $(0,51...0,65) r_g$ (см. рис. 5.9 и рис. 5.10, а). Только, когда слои повышенной жесткости представляют непосредственную почву и кровлю одновременно ширина зоны распространяется по напластованию угольного пласта до $0,93 r_g$ (см. рис. 5.10, б). Однако при этом в самом угольном пласте ширина зоны заметно меньше, чем в других вариантах и не превышает $0,42 r_g$.

а)



б)

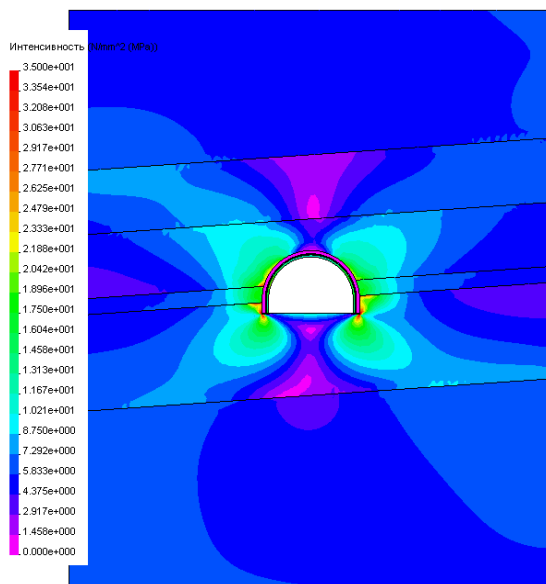


Рис. 5.7. Эпюры приведенных напряжений σ в вариантах:
а) вариант №1; б) вариант №18

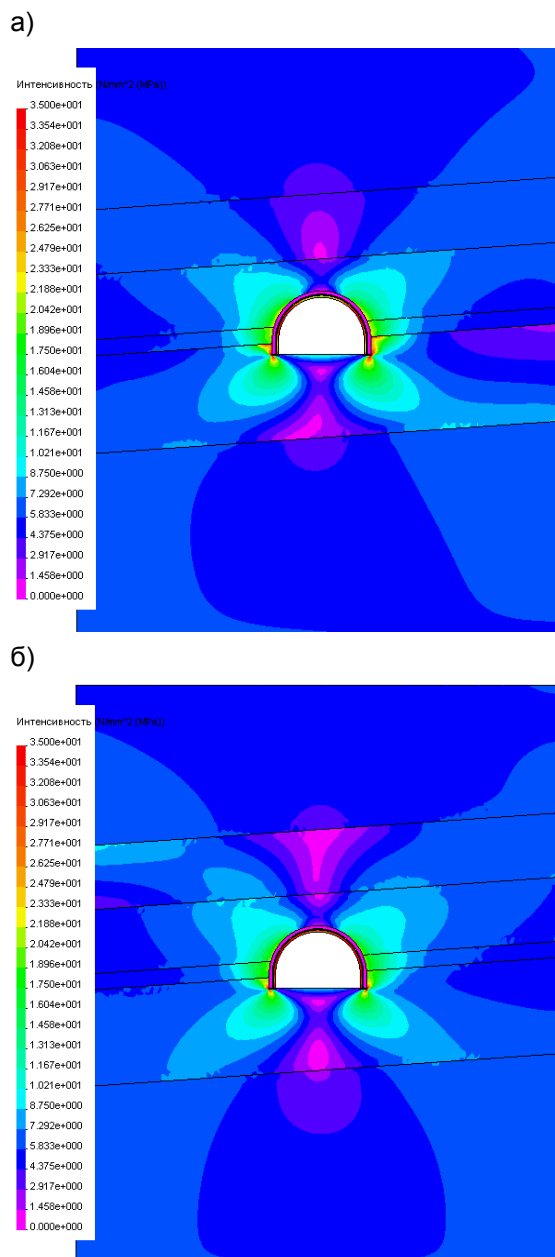
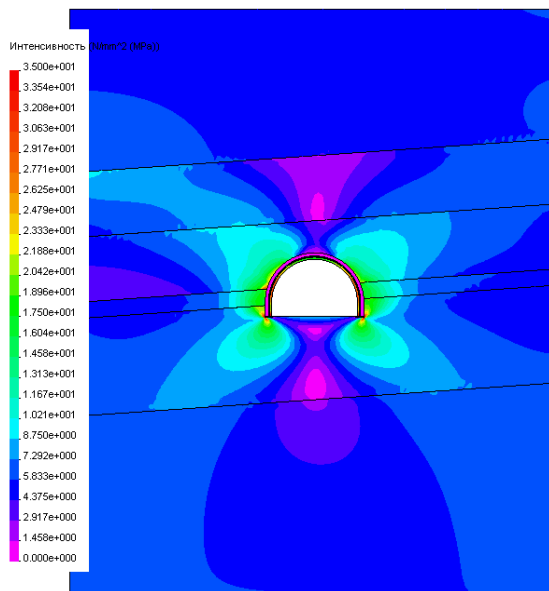


Рис. 5.8. Эпюры приведенных напряжений σ в вариантах:
а) вариант №8; б) вариант №10

а)



б)

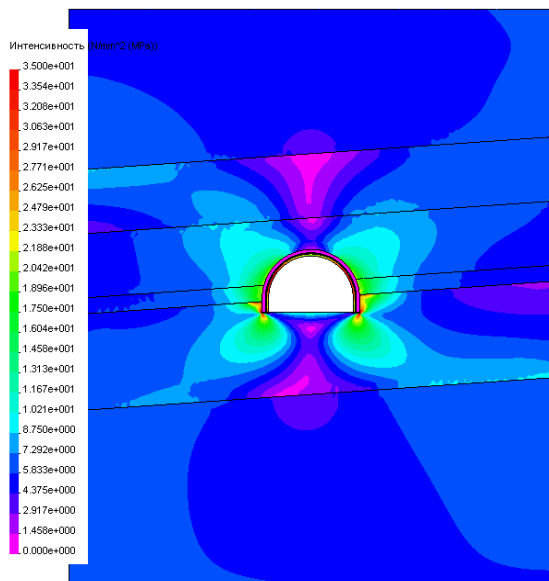


Рис. 5.9. Эпюры приведенных напряжений σ в вариантах:
а) вариант №14; б) вариант №16

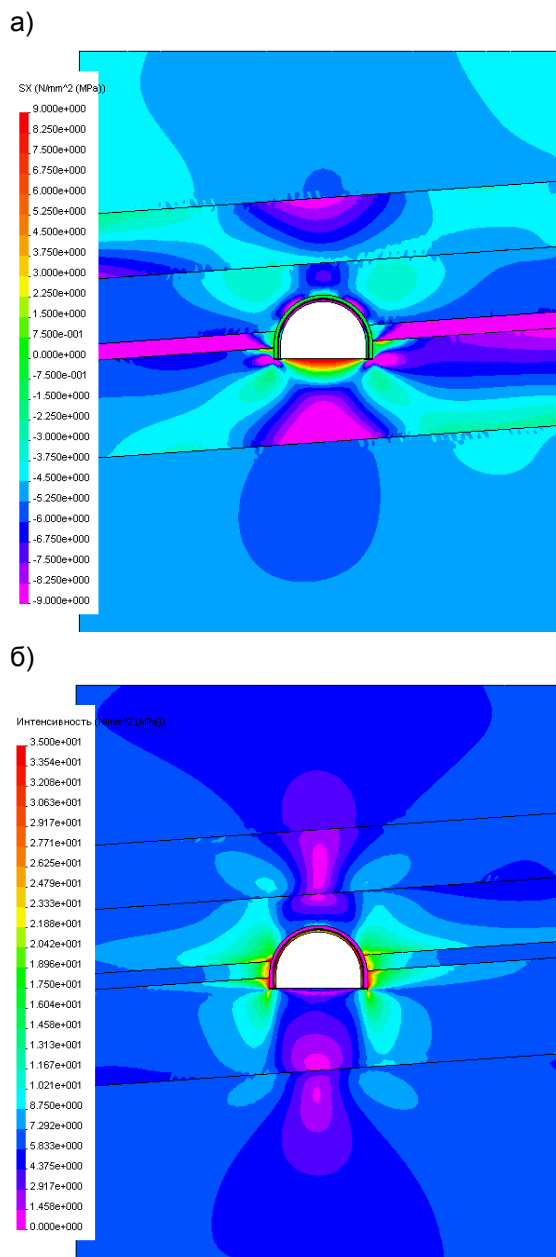


Рис. 5.10. Эпюры приведенных напряжений σ в вариантах:
а) вариант №3; б) вариант №7

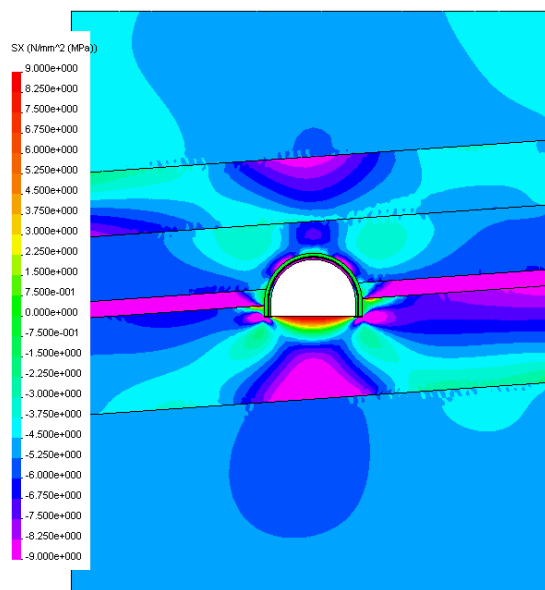
Таким образом, даже когда соседние породные слои различаются по модулю деформации более, чем в 3 раза, можно говорить о достаточной стабильности минимальной ширины зоны предельного состояния боковых пород (расчетный предел прочности массива равен 20 МПа) порядка $(0,51...0,65)r_g$. Вариант одновременной повышенной жесткости слоев непосредственной кровли и почвы одновременно является гипотетическим и на шахтах Западного Донбасса не встречается.

Очевидно, что в условиях, когда расчетная прочность на сжатие менее 20 МПа, ширина зоны предельного состояния породы в боках магистрального штрека значительно увеличивается, но тенденции связи с деформационными характеристиками слоев сохраняются.

5.4. ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ

Связь напряженного состояния пород почвы с деформационными характеристиками близлежащих пластов аналогична выявленным закономерностям для пород кровли. Разница заключается лишь в том, что размеры зоны разгрузки, а также зоны с $\sigma_y = 0$ в почве штрека несколько меньше, чем в кровле (см. рис. 5.1-5.6). Также, за исключением варианта №7, наблюдается достаточная стабильность глубины зоны, где вертикальные напряжения $\sigma_y = 0$ (предельное состояние слабых пород Западного Донбасса по растягивающим напряжениям), на уровне $(1,2...1,4)r_g$. Растягивающие горизонтальные напряжения σ_x распространяются на гораздо меньшую глубину. Но, изменение растяжения на сжатие с глубиной первого слоя почвы в сочетании с действием на этих участках растягивающих напряжений σ_y только интенсифицируют процесс наступления предельного состояния породы. Такое положение вещей наблюдается и для других «разнополюсных» соотношений модулей деформации близлежащих слоев (рис. 5.11 и 5.12). Причем, в нижней части слоя непосредственной почвы сжимающие напряжения σ_x иногда достигают $(15...25)$ МПа, что само по себе может привести к разрушению слабой породы. Поэтому, с некоторым запасом можно утверждать, что предельное состояние охватывает весь первый породный слой почвы под штреком, то есть распространяется на глубину до $2r_g$. Этот вывод учтен при исследовании предельного состояния почвы пластовой выработки.

а)



б)

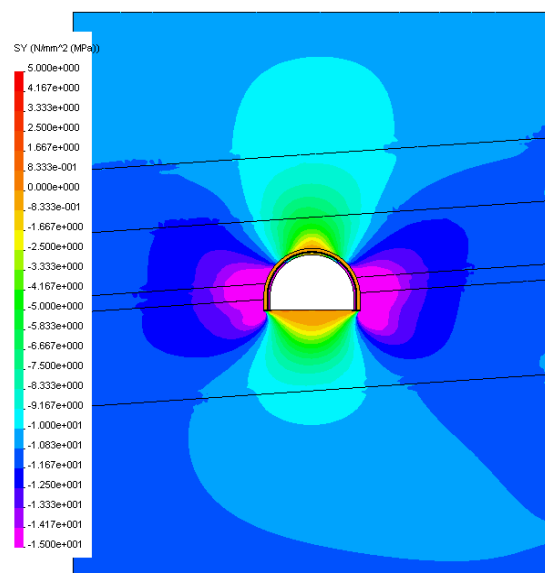
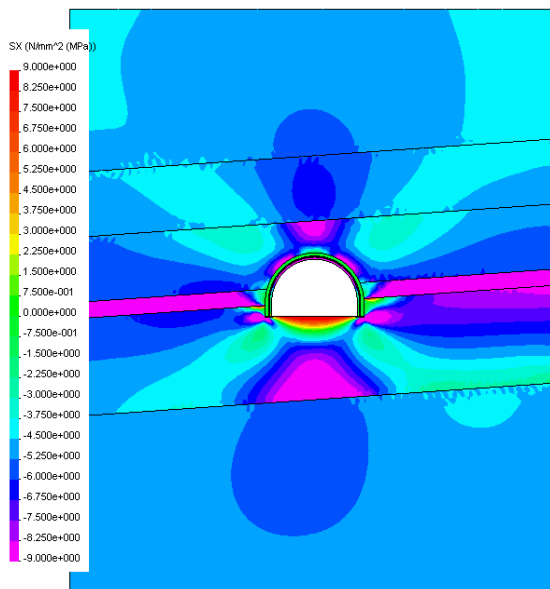


Рис. 5.11. Эпюры горизонтальных (а) и вертикальных (б) напряжений для варианта №16

а)



б)

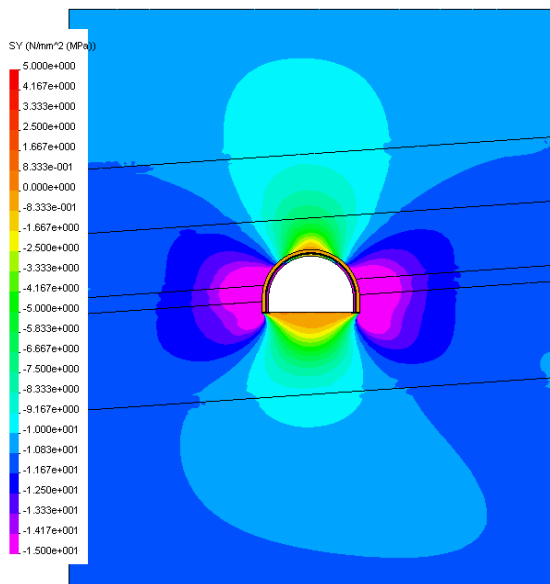


Рис. 5.12. Эпюры горизонтальных (а) и вертикальных (б) напряжений для варианта №8

5.5. ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ РАМНОЙ КРЕПИ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ

В рамной крепи максимумы всех компонент напряжений располагаются на контакте стойки с опорной плитой, что связано со специфическими краевыми эффектами условий опирания и действием весьма сосредоточенных нагрузок. Однако этот локальный узел не характеризует несущую способность (предельное состояние) самой рамной крепи, а основным критерием является действие компонент σ_y , σ_x , τ_{xy} (и в результате σ) по всему контуру рамы, что и предопределяет задачу данных исследований. При этом интерес представляет не столько абсолютное значение перечисленных компонент напряжений, сколько относительное их изменение, вызванное переменной соотношений модулей деформации близлежащих к пластовой выработке породных слоев.

За базу сравнения выбран вариант №1, когда весь массив однороден с пониженной жесткостью (см. табл. 5.1). Вертикальные напряжения σ_y в своде рамы преимущественно колеблются вокруг нулевого значения с небольшим сжатием на наружном контуре. Наиболее нагружены стойки рамы в большей мере сжимающими напряжениями; но появление растягивающих напряжений в этих же сечениях в противоположных крайних волокнах указывает на наличие изгибающего момента. В стойках рамы сжимающие напряжения σ_y превышают растягивающие в 7,3...7,9 раз, что приводит к необходимости учета совместного действия всех видов нагружения при определении предельного состояния материала рамы. Обращает внимание тот факт, что когда в кровле выработки имеется хотя бы один жесткий породный слой сжимающие и растягивающие напряжения σ_y снижаются до 1,45 раза.

Горизонтальные напряжения σ_x относительно невелики в стойках рамы, а в ее своде преобладают сжимающие напряжения с переходом в растягивающие в нижних волокнах сечения, что также указывает на действие изгибающего момента в своде. Снижение величины σ_x под защитой более жестких породных слоев менее заметно, чем для компоненты σ_y .

Касательные напряжения τ_{xy} по контуру рамы распределены практически симметрично относительно вертикальной оси выработки с переменной знака при переходе с одной полуветви контура на другую.

Максимумы τ_{xy} расположены, примерно под углом $40^\circ...50^\circ$ к вертикальной оси выработки. Под защитой более жестких породных слоев в кровле максимумы τ_{xy} снижаются до 1,7 раза.

Приведенные напряжения σ имеют максимумы в стойках и своде рамы, но последний, как правило, меньше по величине, чем остальные. Закономерность связи σ с деформационными характеристиками породных слоев

имеет такие тенденции. Если взять за 100% величину σ для варианта №1 однородного слоистого массива с пониженным модулем деформации, то более высокая (на 7,7%) величина σ проявилась в варианте №8 с породным слоем повышенной жесткости в почве выработки, что может быть объяснено наличием жесткой опоры для стоек рамы, препятствующей ее податливости и “ухода” от части горного давления.

В варианте №10 повышенной жесткости второго слоя в кровле выработки приведенное напряжение несколько ниже базового (на 3,8%) по причине некоторого, хотя и весьма слабого ограничения влияния перемещений вышележащих пород в полость выработки.

В вариантах №3, 7, 14 повышенной жесткости первого породного слоя кровли снижение σ происходит более интенсивно (20,6...23,7%) по причине более эффективного ограничения перемещений вышележащих пород в полость выработки. И, наконец, когда все близлежащие породные слои (в том числе и почвы по варианту №18) обладают повышенной жесткостью происходит максимальное ограничение смещений вмещающего массива и величина приведенных напряжений снижается на 57,5%, то есть, более, чем вдвое.

Подытоживая исследования данного раздела можно сделать ряд выводов.

Во-первых, несмотря на различные соотношения деформационных характеристик слоев пород в окрестности пластовой выработки в ее кровле и почве размеры зон предельного состояния достаточно стабильны и охватывают:

- в кровле два породных слоя (по высоте до $2,33 r_g$);
- в почве один породный слой (по глубине до $2,0 r_g$).

Предельное состояние наступает в приконтурных породах на высоту $(1,4...1,5) r_g$ в кровле и глубину $(1,2...1,4) r_g$ в почве выработки от действия растягивающих напряжений. При приближении к границам породных слоев в кровле и почве предельное состояние наступает от действия также горизонтальных сжимающих напряжений в результате прогиба породных слоев в полость выработки.

Во-вторых, в боках выработки предельное состояние пород наступает в результате действия вертикальных сжимающих напряжений σ_y (наподобие опорного давления). Ширина зоны предельного состояния зависит от прочностных характеристик породных слоев и минимальные ее размеры (при максимальной прочности) для Западного Донбасса достаточно стабильны и составляют порядка $(0,55...0,65) \sigma_y$. При менее прочных вмещающих породах ширина зоны предельного равновесия интенсивно расширяется.

В-третьих, максимумы приведенного напряжения в рамной крепи, определяющие ее несущую способность, существенным образом зависят от соотношения деформационных характеристик близлежащих породных слоев. Снижение напряжений σ происходит в случае залегания в непосредственной кровле хотя бы одного породного слоя повышенной жесткости.

6. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ СИСТЕМЫ «МАССИВ-КРЕПЬ» С УВЕЛИЧЕНИЕМ ГЛУБИНЫ РАЗРАБОТКИ

При описании методики исследований влияния соотношения деформационных характеристик породных слоев было отмечено, что весь комплекс расчетов по перебору указанных в табл. 5.1 вариантов был выполнен также для глубин $H = 200$ м и $H = 600$ м. Таким образом, охвачен весь диапазон изменения глубины расположения пластовых выработок, характерный для Западного Донбасса.

Тенденции изменения НДС системы «массив-крепь» при варьировании модулей деформации слоев для глубин $H = 200$ м и $H = 600$ м остаются такими же, как и для глубины $H = 400$ м; изменяются только количественные показатели. Задача данных исследований состоит в оценке степени влияния глубины H расположения пластовой выработки на НДС системы и особенно на размеры зоны предельного состояния пород.

6.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОРОДАХ КРОВЛИ ВЫРАБОТКИ

В однородном слоистом массиве пониженной жесткости (вариант №1) эпюры вертикальных напряжений σ_y качественно подобны для глубин $H = 200$ м и $H = 600$ м (рис. 6.1) с глубиной $H = 400$ м (см. рис. 5.1, а). По критерию $\sigma_y = 0$ высота зоны предельного равновесия в кровле составляет $1,02 r_g$ при $H = 200$ м и $1,81 r_g$ при $H = 600$ м. Если учесть, что соответствующая высота при $H = 400$ м составила $1,40 r_g$, то наблюдается близкая к линейной связь высоты зоны предельного равновесия пород в кровле выработки с глубиной ее расположения. Однако интенсивность роста высоты зоны предельного равновесия меньше роста параметра H : при увеличении H в 3 раза (с 200 до 600 м) высота зоны предельного равновесия пород возросла только в 1,77 раза.

Анализ других «разнополюсных» вариантов (№3, 7, 8, 10, 14, 16 и 18 в табл. 5.1) подтвердил два вывода (рис. 6.2...6.8):

- во-первых, близкую к линейной связь высоты зоны предельного равновесия пород в кровле выработки с глубиной ее расположения;
- во-вторых, достаточно узкий (за исключением не характерного для Западного Донбасса варианта №7) интервал изменения высоты зоны с $\sigma_y = 0$ при различных соотношениях модулей деформации близлежащих породных

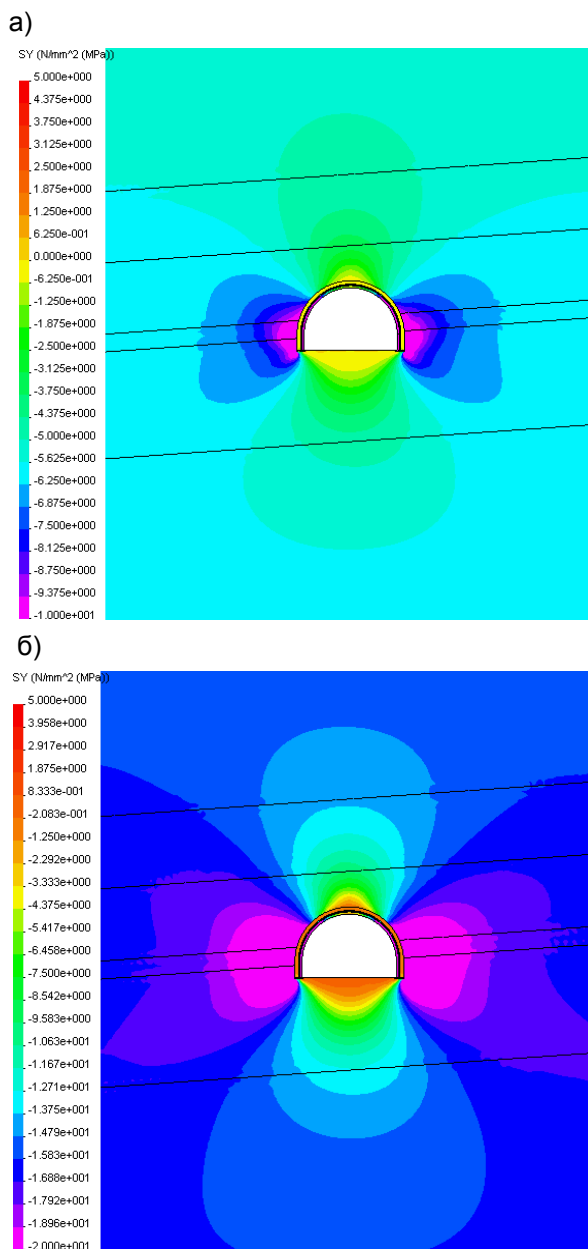
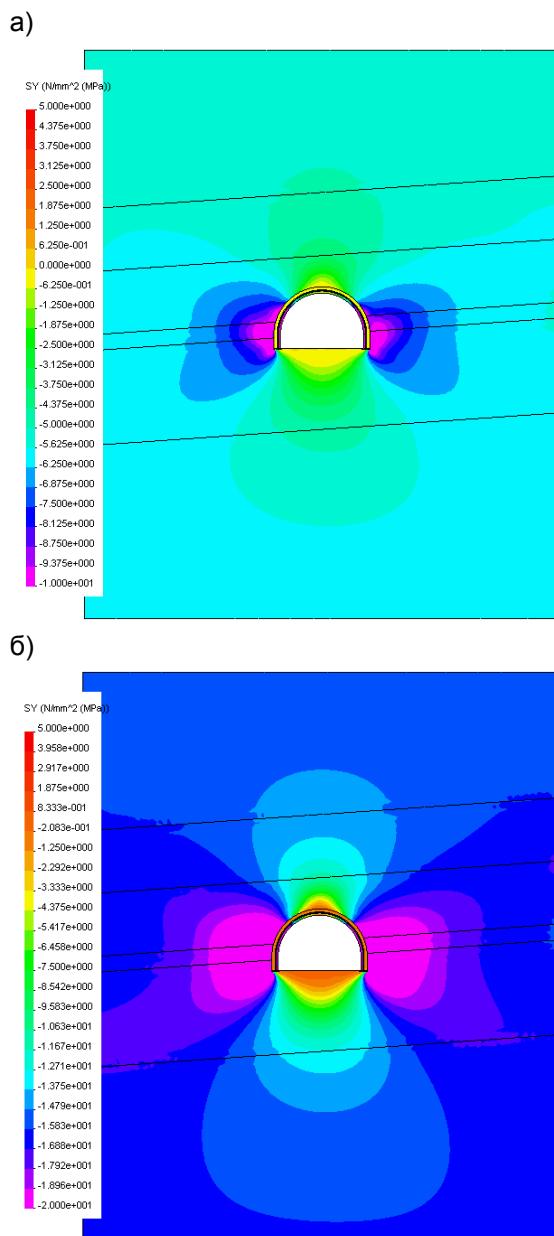
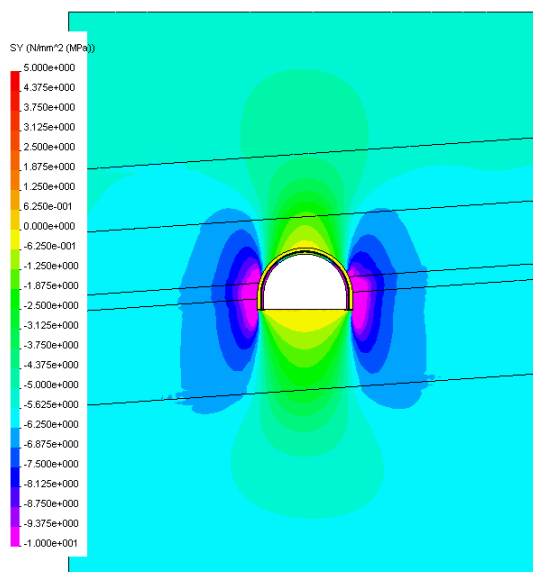


Рис. 6.1. Эпюры вертикальных напряжений σ_y для варианта №1 при:

а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

Рис. 6.2. Эпюры вертикальных напряжений σ_y для варианта № 3 при:а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

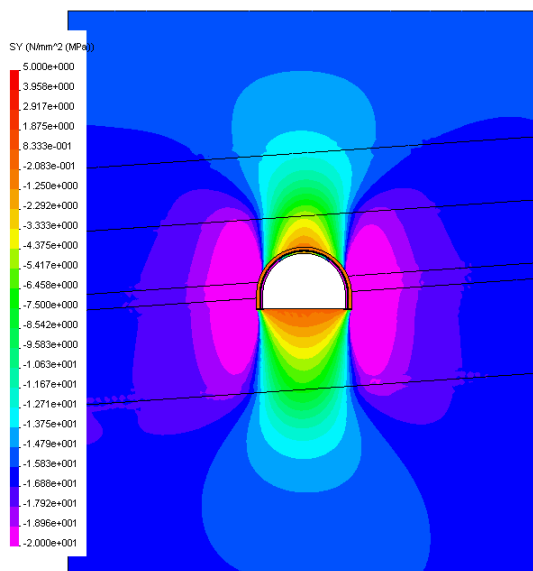
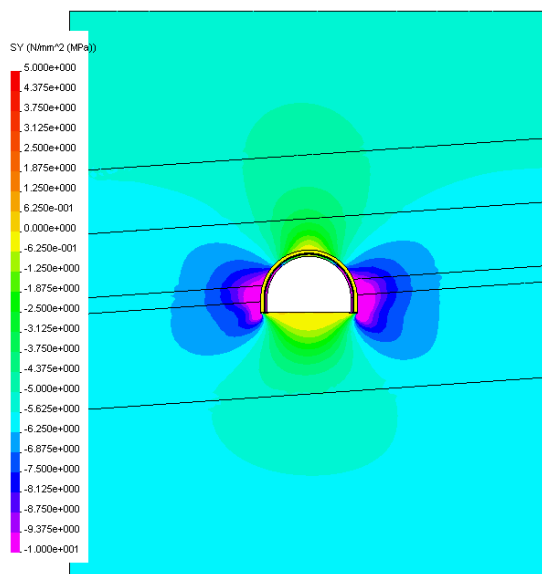


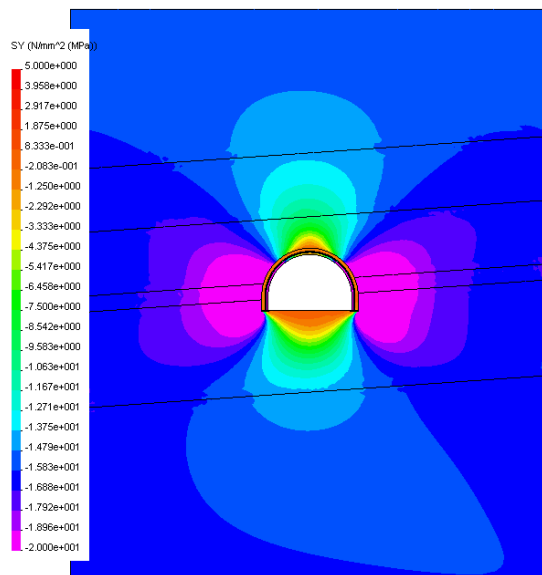
Рис. 6.3. Эпюры вертикальных напряжений σ_y для варианта №7 при:

а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

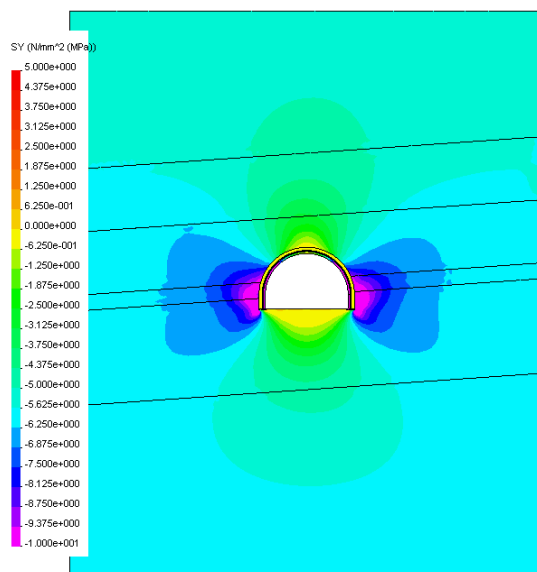
а)



б)

Рис. 6.4. Эпюры вертикальных напряжений σ_y для варианта №8 при:а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

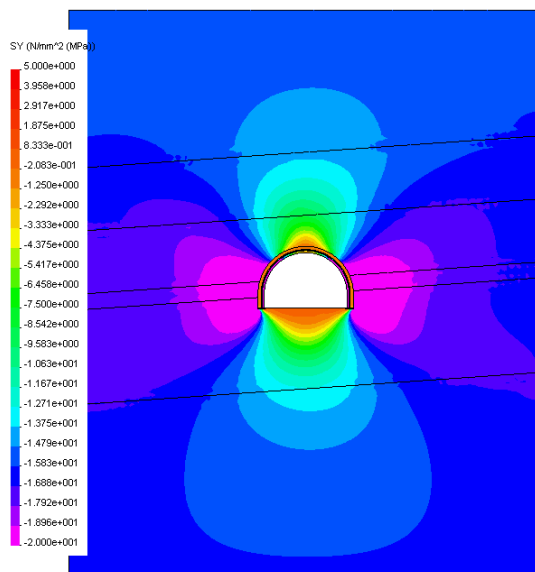
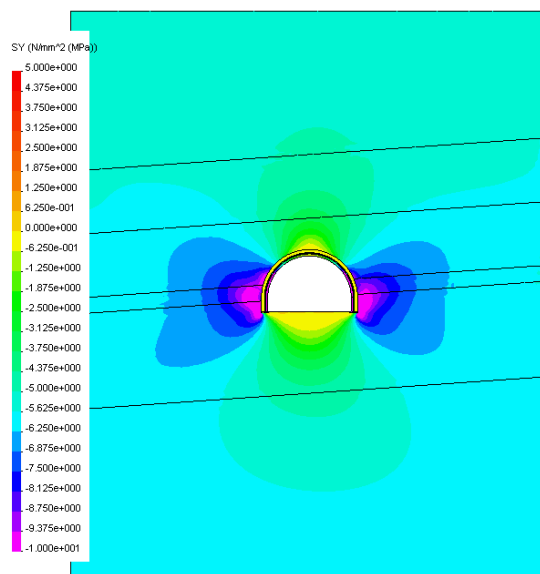


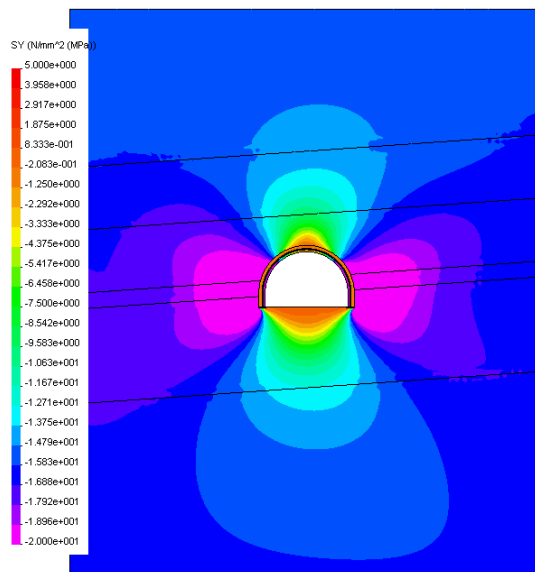
Рис. 6.5. Эпюры вертикальных напряжений σ_y для варианта №10 при:

а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

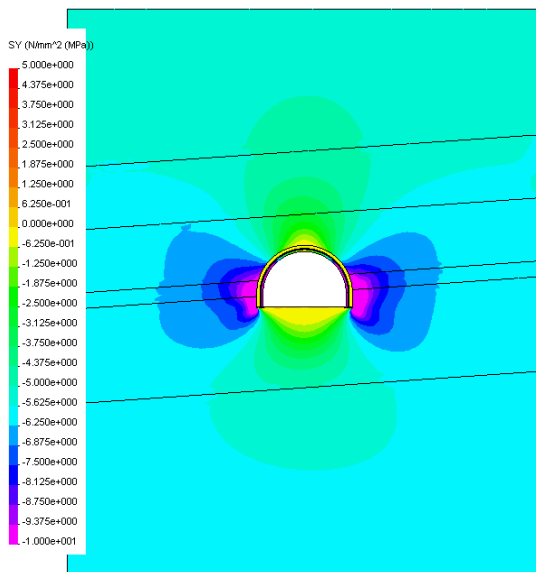
а)



б)

Рис. 6.6. Эпюры вертикальных напряжений σ_y для варианта №14 при:а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

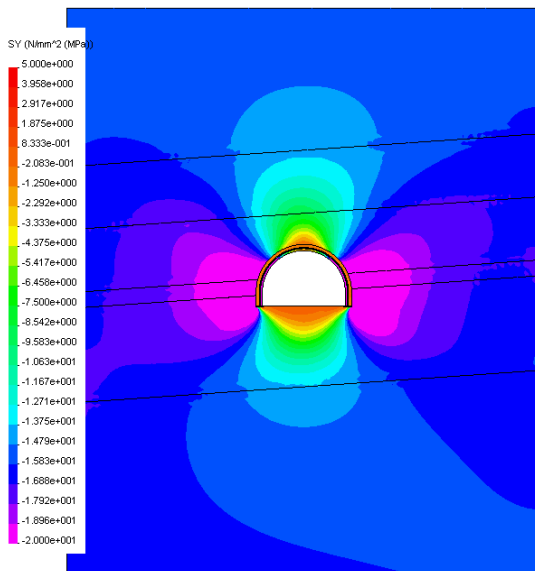
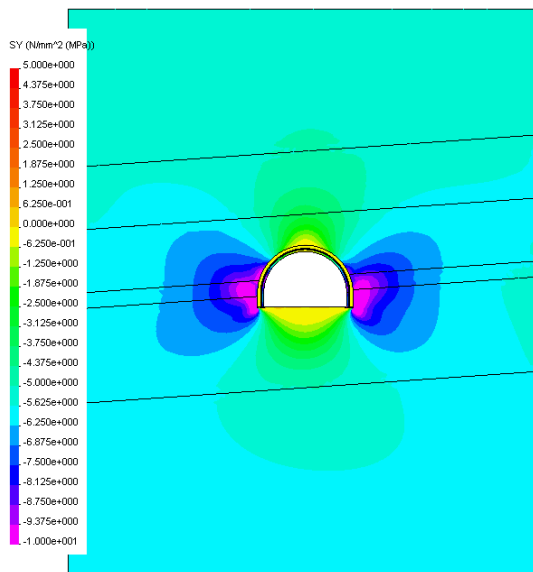


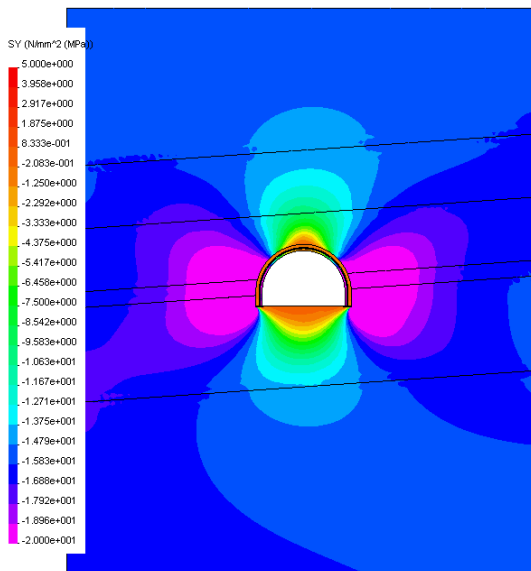
Рис. 6.7. Эпюры вертикальных напряжений σ_y для варианта №16 при:

а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

Рис. 6.8. Эпюры вертикальных напряжений σ_y для варианта №18 при:а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

слоев кровли и почвы: $(0,76...1,26) r_g$ при $H = 200$ м, $(1,12...1,58) r_g$ при $H = 400$ м и $(1,40...1,91) r_g$ при $H = 600$ м.

Как видно из приведенных данных с увеличением глубины расположения выработки относительный интервал изменения высоты зоны предельного равновесия пород уменьшается (40% при $H = 200$ м, 29% при $H = 400$ м, 27% при $H = 600$ м), то есть снижается степень влияния соотношения деформационных характеристик вмещающих штрек породных слоев.

6.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОРОДАХ ПОЧВЫ ВЫРАБОТКИ

Вблизи контура выработки в породах почвы пластовой выработки, также как и в кровле, действуют растягивающие горизонтальные напряжения σ_x , однако в почве зона их действия гораздо обширнее, что свидетельствует о деформировании почвы в полость выработки. Глубина распространения растягивающих горизонтальных напряжений оценена по условию $\sigma_x = 0$, которое по сути является условием предельного состояния пород по причине практически полного отсутствия сопротивления растяжению слабых пород Западного Донбасса с учетом действия ослабляющих факторов [156, 157].

Анализ эпюр (рис. 6.9...6.16) горизонтальных напряжений в почве выработки при разной глубине ее расположения приводит к следующим выводам:

- во-первых, глубина распространения растягивающих напряжений σ_x при всех вариантах соотношений модулей деформации близлежащих породных слоев колеблется в достаточно узком интервале $(0,55...0,65) r_g$;

- во-вторых, глубина распространения растягивающих напряжений σ_x практически не зависит от глубины расположения выработки.

Полученные результаты говорят о том, что компонента σ_x не является решающей при образовании зоны предельного равновесия пород в почве выработки.

Процесс пучения почвы в большей степени определяют вертикальные растягивающие напряжения σ_y , анализ которых (см. рис. 6.1...6.8) дает следующие результаты.

Во-первых, вертикальные растягивающие напряжения затрагивают более обширную зону в почве выработки, чем компонента σ_x . Так, при $H = 200$ м глубина зоны предельного равновесия составляет $(0,98...1,17) r_g$, а при $H = 600$ м она увеличивается до $(1,35...1,63) r_g$. Исключением, как и в предыдущих исследованиях, является нехарактерный для Западного Донбасса вариант №7 залегания в непосредственной кровле и почве породных слоев повышенной жесткости, когда в почве образуется обширная зона (до $2,93 r_g$)

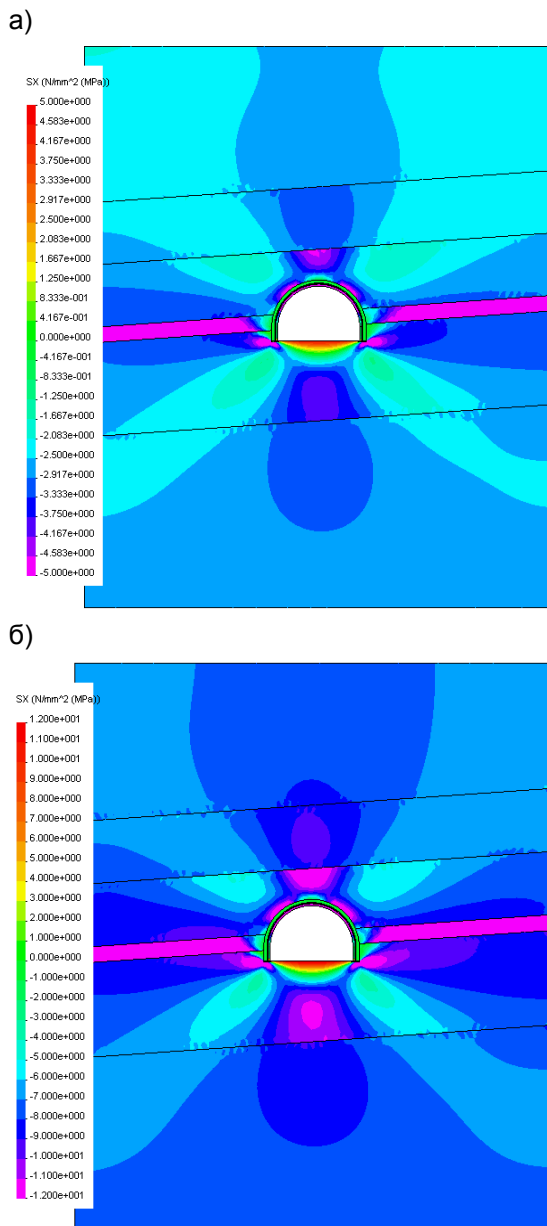


Рис. 6.9. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x для варианта №1 при:

а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

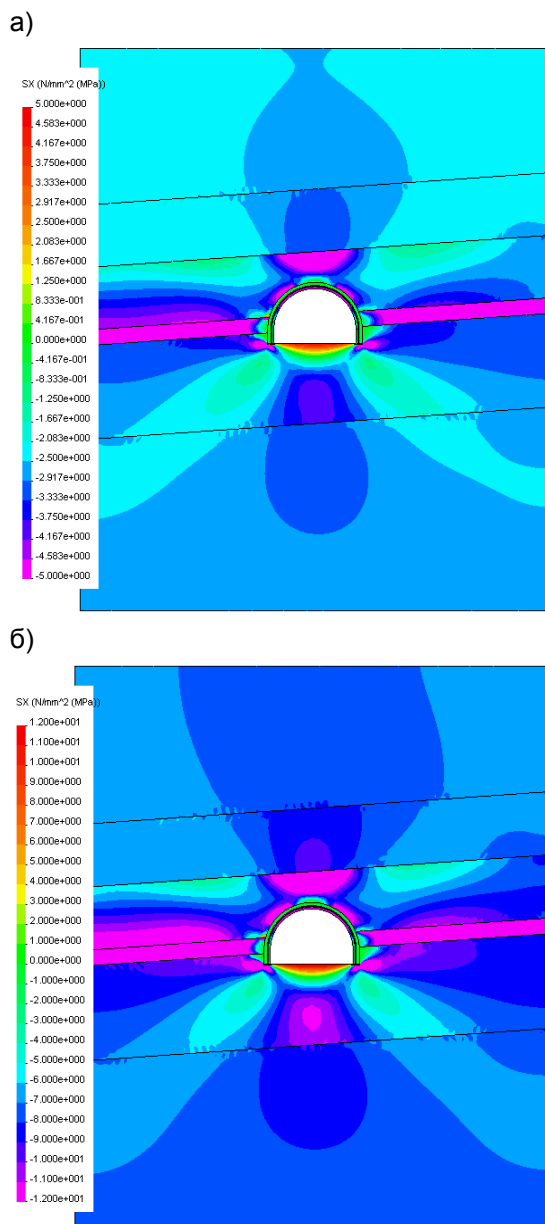
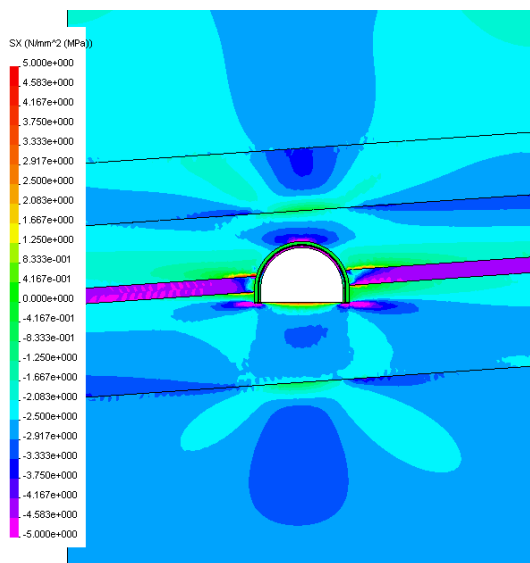
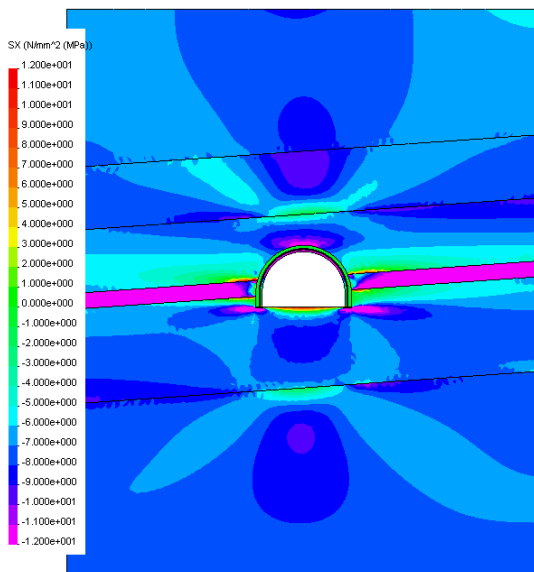


Рис. 6.10. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x для варианта №3 при:
а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

Рис. 6.11. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x для варианта №7 при:а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

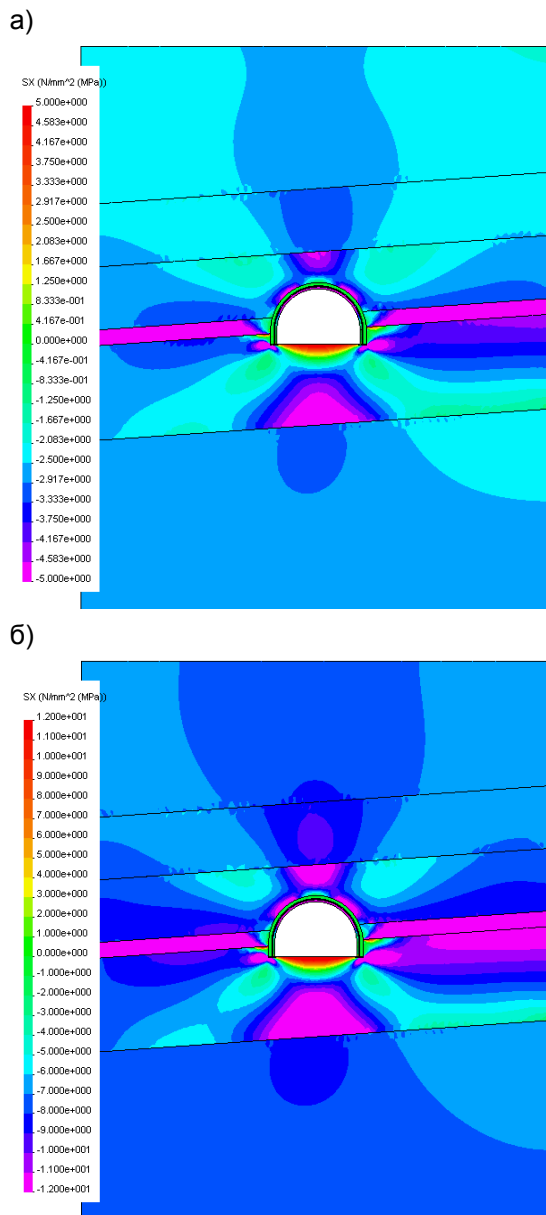
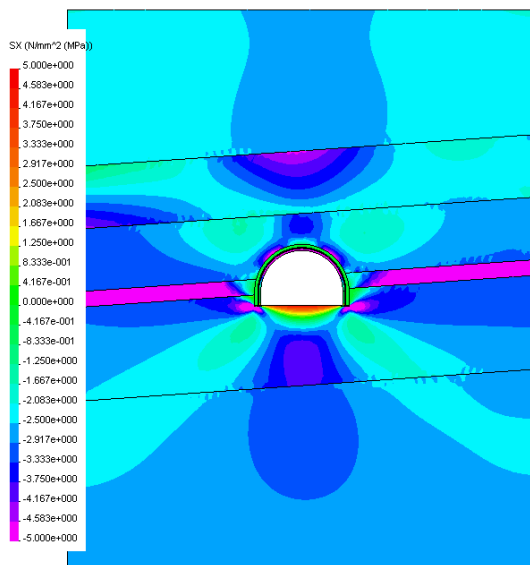
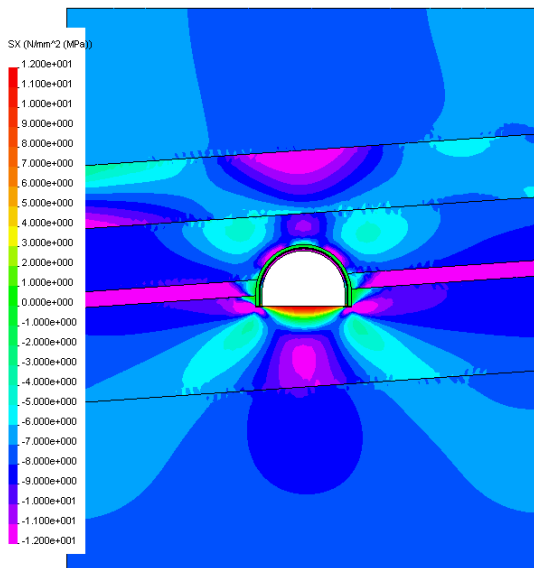


Рис. 6.12. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x для варианта №8 при:
а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

Рис. 6.13. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x для варианта №10 при:а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

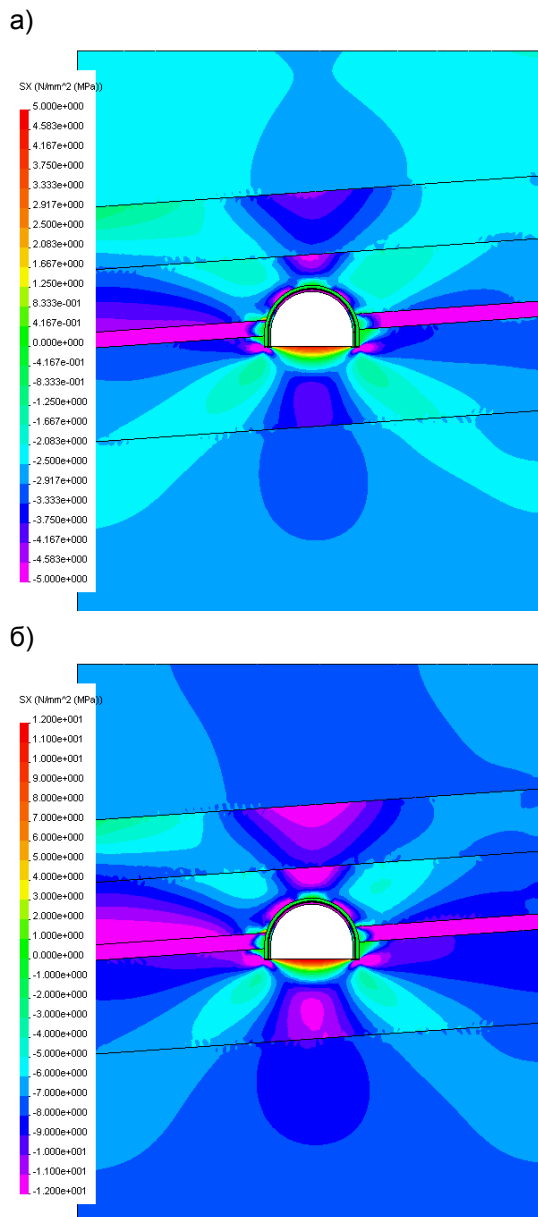


Рис. 6.14. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x для варианта №14 при:
а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

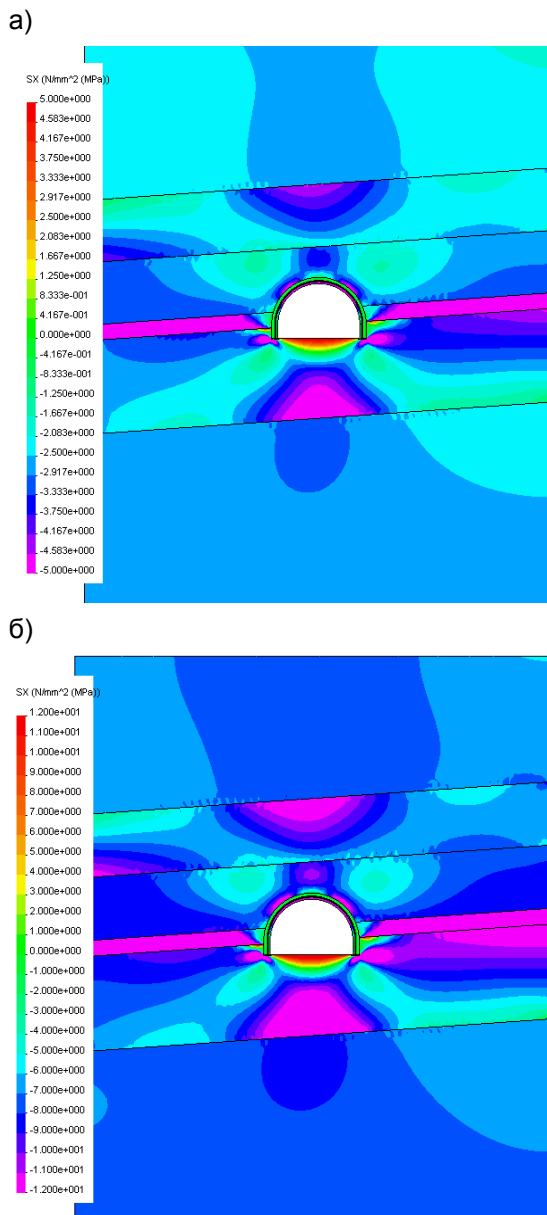
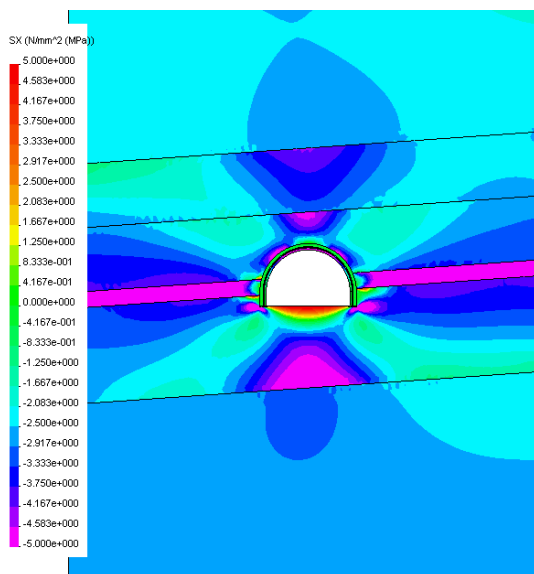


Рис. 6.15. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x для варианта №16 при:
а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

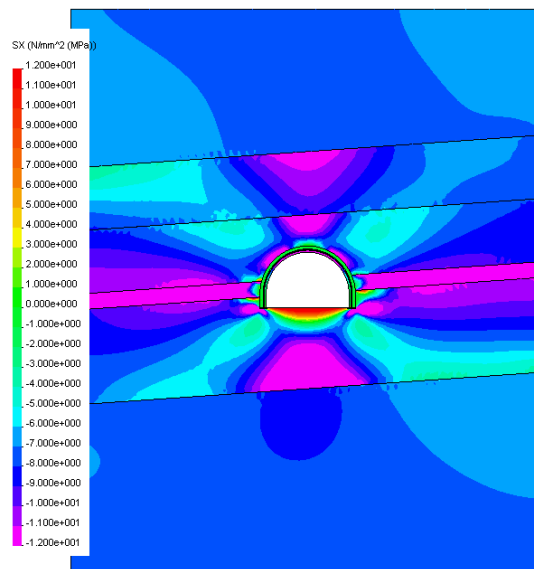


Рис. 6.16. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x для варианта №18 при:

а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

предельного равновесия. Тем не менее, учитывая повышенные площади сечения магистральных штреков ($r_g = 2,3...3$ м), абсолютная глубина зоны предельного равновесия может составлять 4...5 м.

Во-вторых, имеет место достаточно узкий интервал изменения глубины зоны предельного равновесия даже при различных «разнополюсных» соотношениях модулей деформации породных слоев. Так, относительное отклонение составляет от 16,2% при $H = 200$ м до 17,2% при $H = 600$ м. Таким образом, изменение соотношений модулей деформации близлежащих породных слоев не столь заметно сказывается на глубине зоны предельного равновесия в почве выработки.

В-третьих, интенсивность роста глубины зоны предельного равновесия с увеличением глубины разработки в почве выработки заметно меньше, чем в кровле. Например, при росте параметра H в три раза (с 200 до 600 м) глубина зоны увеличивается всего в 1,25...1,48 раза.

6.3. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОРОДНЫХ БОКАХ ВЫРАБОТКИ

В приконтурных боковых породах пластовой выработки действуют повышенные сжимающие напряжения σ_y с концентрацией (2...3) γH и более, а также в основном сжимающие горизонтальные напряжения σ_x пониженной величины по отношению к исходным напряжениям σ_x негидростатического поля. Для оценки такого неравнокомпонентного состояния использована, как и ранее, величина приведенного напряжения σ .

Установлено, что в условиях Западного Донбасса расчетная величина сопротивления пород сжатию (с учетом ослабляющих факторов [156, 157]) не превышает 20 МПа. На данном этапе исследований проанализировано влияние на ширину зоны предельного равновесия в боках выработок таких параметров, как: глубина расположения пластовой выработки, соотношение модулей деформации близлежащих породных слоев и их расчетное значение предела прочности на сжатие $R_{сж}$. Анализ нормативных документов [156, 157] показал, что для условий Западного Донбасса влияние ослабляющих факторов (трещиноватость, увлажнение, реология) приводит к снижению расчетной прочности породы на сжатие $R_{сж}$ как минимум вдвое по отношению к величине прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ в образце. Учитывая среднестатистический интервал [157] изменения параметра $\sigma_{сж} = 10...40$ МПа, исследованы размеры зоны предельного равновесия при диапазоне расчетной прочности на сжатие $R_{сж} = 5...20$ МПа. Анализ изменения ширины зоны предельного равновесия на первом этапе проведен для трех значений $R_{сж} = 5$ МПа, 10 МПа и 20 МПа по величине приведенного напряжения σ , эпюры которого для «раз-

нополюсных» вариантов ($H = 200$ м и 600 м) соотношения модулей деформации породных слоев приведены на рис. 6.17...6.24. При $H = 400$ м эпюры приведены на рис. 5.7...5.10.

Анализ выполнен, начиная с величины расчетного сопротивления пород сжатию $R_{сж} = 5$ МПа, результаты которого позволяют сделать следующие выводы.

Во-первых, величина приведенных напряжений $\sigma \leq 5$ МПа локализуется внутри модели только при $H = 200$ м; при $H = 400$ м и $H = 600$ м ширина зоны предельного состояния выходит за рамки модели, то есть составляет более $4,74 r_g$. Это объясняется низкой расчетной прочностью на сжатие вмещающих штрек пород при относительно высоком начальном горном давлении: широко применяемый показатель $\frac{\gamma H}{R_{сж}} = 2$ при $H = 400$ м и $\frac{\gamma H}{R_{сж}} = 3$ при $H = 600$ м, что по нормативным методикам [156, 157] приводит к высоким смещениям породного контура выработки и образованию обширной зоны предельного равновесия.

Во-вторых, при $H = 200$ м $\left(\frac{\gamma H}{R_{сж}} = 1 \right)$ наблюдается довольно стабильная ширина зоны предельного состояния в боках выработки от $1,30 r_g$ до $1,53 r_g$ вне зависимости от соотношения модулей деформации близлежащих породных слоев. Исключение составляет вариант №7, где ширина зоны по плоскостям напластования с угольным пластом распространяется до $2,19 r_g$; однако этот вариант расположения породных слоев повышенной жесткости одновременно в непосредственной кровле и почве не характерен для структуры углевмещающей толщи Западного Донбасса.

Когда прочность углевмещающих пород увеличивается до значения расчетного показателя $R_{сж} = 10$ МПа ширина зоны предельного состояния уменьшается и локализуется внутри модели даже при глубине расположения выработки $H = 600$ м $\left(\frac{\gamma H}{R_{сж}} = 1,5 \right)$, что объективно отражает существующие результаты геомеханических исследований. Обращают внимание следующие установленные факты.

Во-первых, при разных глубинах расположения выработки диапазон изменения ширины зоны предельного равновесия относительно невелик (за исключением варианта №7): $(0,47...0,65) r_g$ при $H = 200$ м, $(1,26...1,67) r_g$ при $H = 400$ м и $(2,16...2,76) r_g$ при $H = 600$ м. В указанных диапазонах влияние величин соотношений модулей деформации породных слоев можно оценить по относительному показателю вариации ширины зоны: 27,7% при $H = 200$ м, 24,6% при $H = 400$ м и 21,7% при $H = 600$ м.

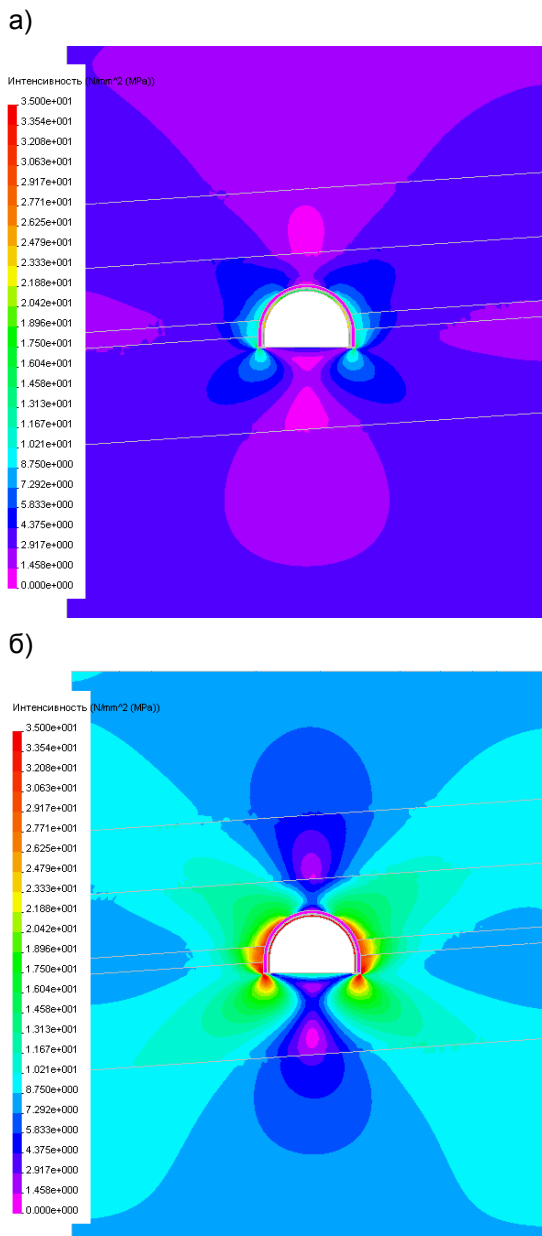


Рис. 6.17. Эпюры приведенных напряжений σ для варианта №1 при:
а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

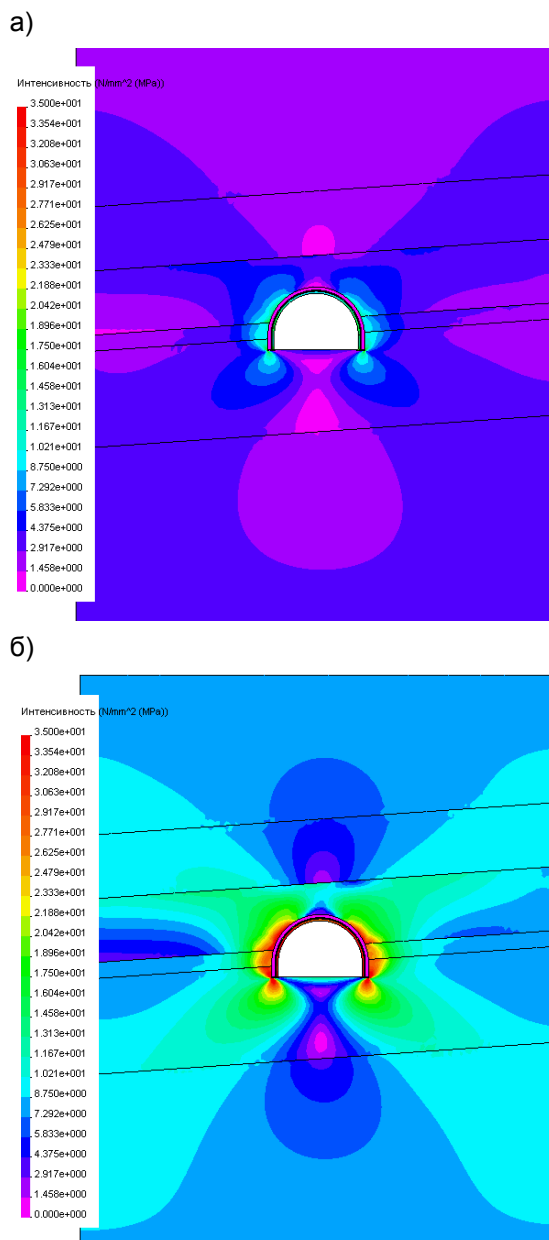
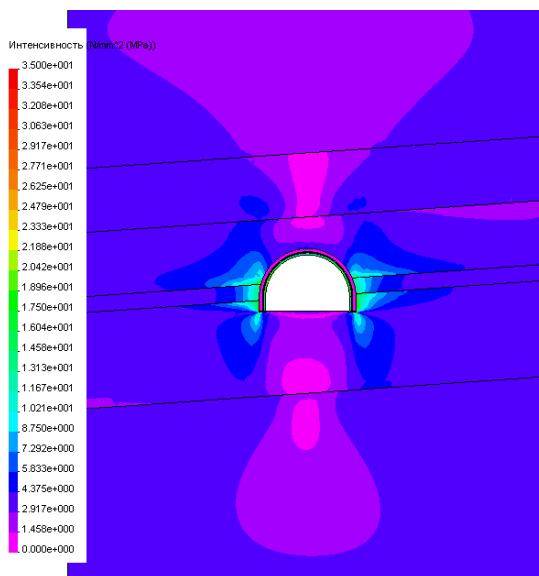


Рис. 6.18. Эпюры приведенных напряжений σ для варианта №3 при:
а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

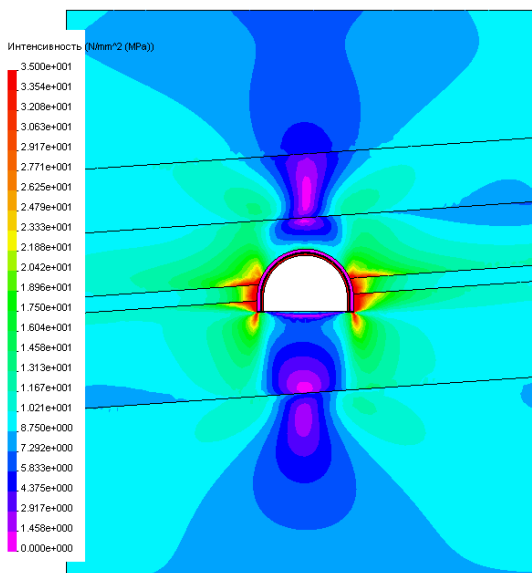
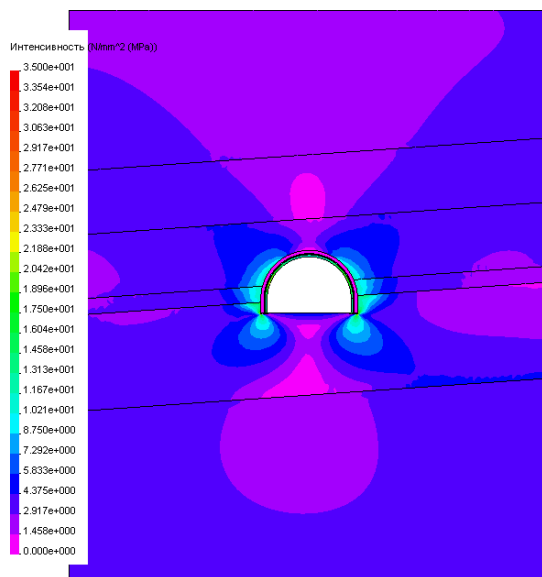


Рис. 6.19. Эпюры приведенных напряжений σ для варианта №7 при:
а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

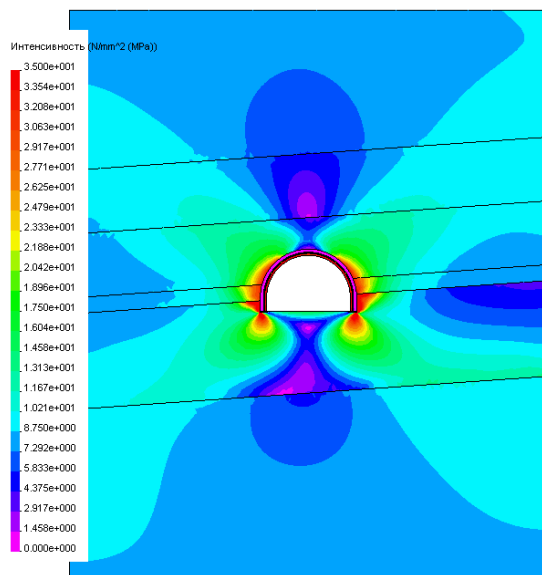
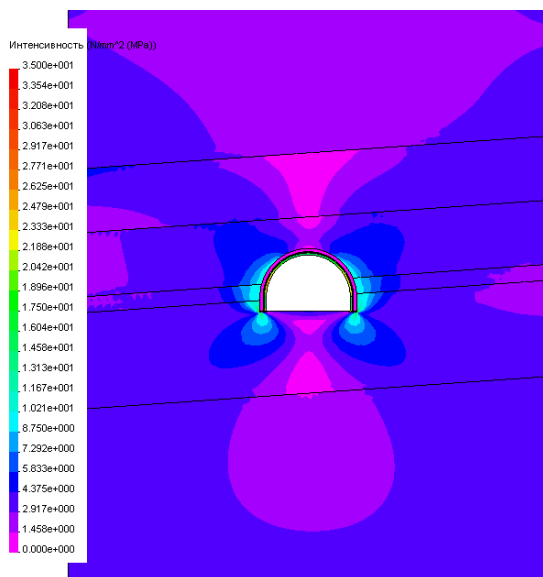


Рис. 6.20. Эпюры приведенных напряжений σ для варианта №8 при:
а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

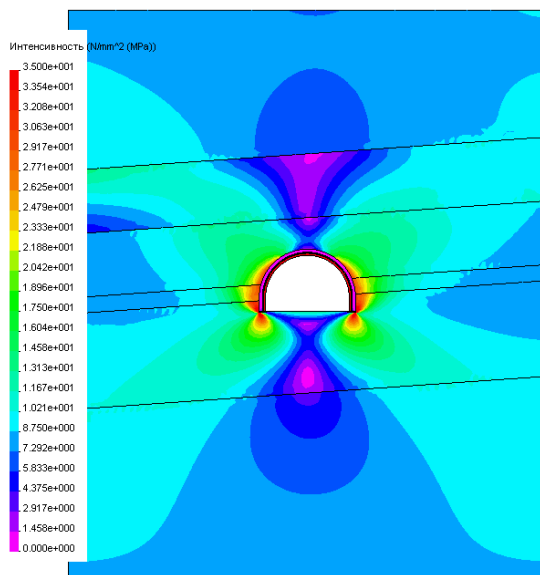


Рис. 6.21. Эпюры приведенных напряжений σ для варианта №10 при:
а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

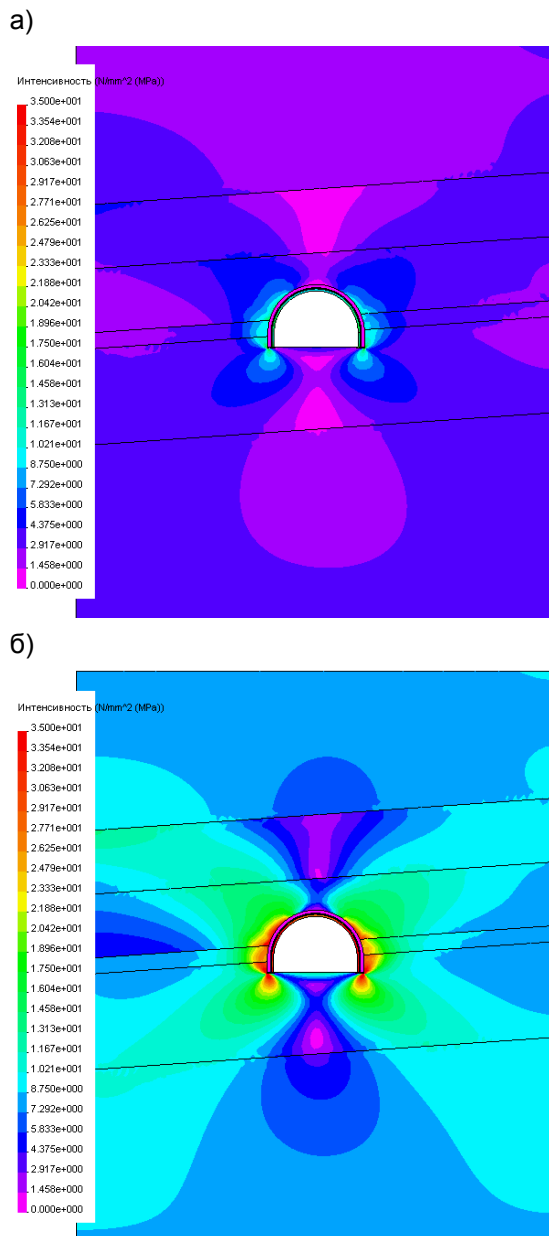
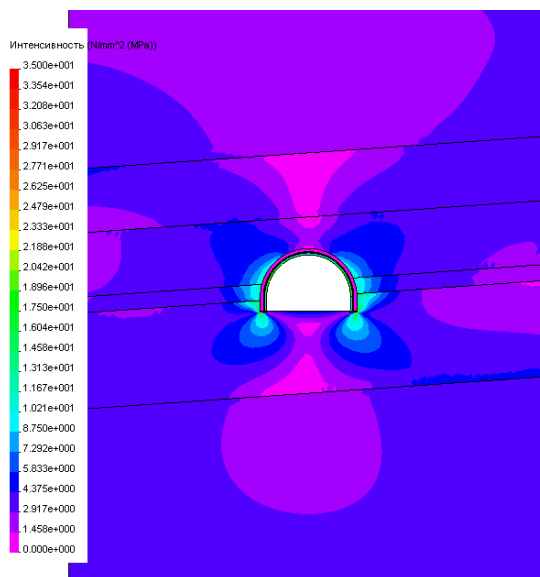


Рис. 6.22. Эпюры приведенных напряжений σ для варианта №14 при:
а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

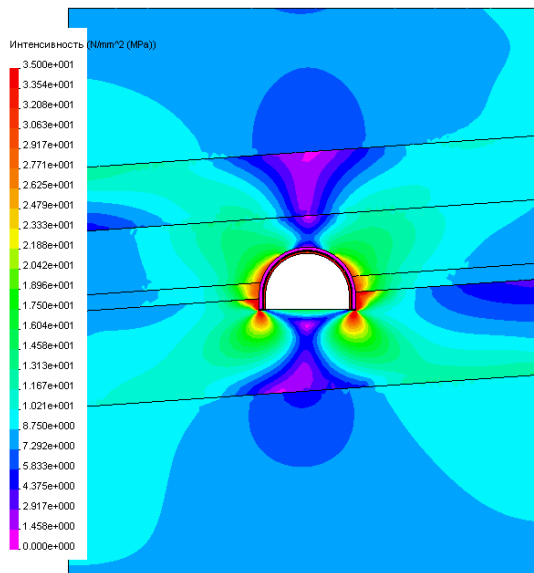


Рис. 6.23. Эпюры приведенных напряжений σ для варианта №16 при:
а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

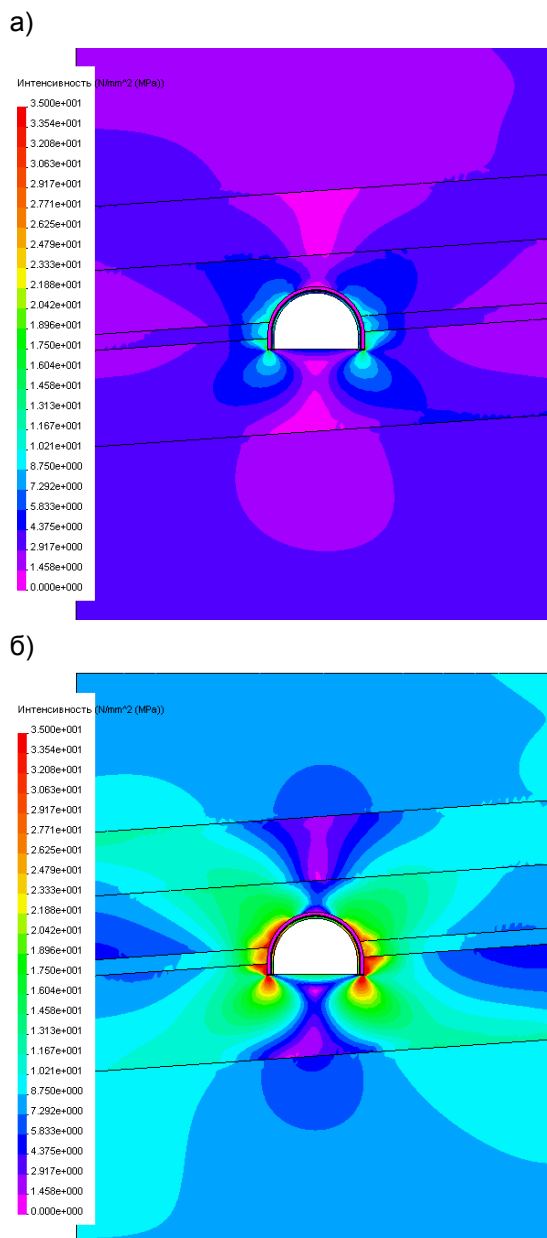


Рис. 6.24. Эпюры приведенных напряжений σ для варианта №18 при:
а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

Во-вторых, если анализировать ширину зоны относительно показателя $\frac{\gamma H}{R_{сж}}$, то при $H = 400$ м и $R_{сж} = 10$ МПа $\left(\frac{\gamma H}{R_{сж}} = 1\right)$, а также при $H = 200$ м и $R_{сж} = 5$ МПа $\left(\frac{\gamma H}{R_{сж}} = 1\right)$ практически наблюдается совпадение размеров зоны: отклонение составляет от 1,4% до 15,7%. Это указывает на весьма тесную связь ширины зоны предельного состояния с параметром $\frac{\gamma H}{R_{сж}}$.

Увеличение прочности боковых пород до расчетного значения $R_{сж} = 20$ МПа еще более сужает зону предельного состояния пород в боках выработки. При $H = 200$ м ширина зоны невелика, порядка $(0,13...0,20)r_g$, и затрагивает только породы на контакте с контуром выработки. Эти данные качественно соответствуют аналитико-экспериментальному методу проф. Ю.З. Заславского [158], который указывает на достаточную устойчивость выработки при $\frac{\gamma H}{R_{сж}} = 0,25$ ($H = 200$ м, $R_{сж} = 20$ МПа).

Максимальная ширина зоны предельного состояния наблюдается при $H = 600$ м и составляет $(0,88...1,12)r_g$ за исключением варианта №7. При этом влияние соотношения модулей деформации породных слоев оценивается до 21,4%. Также подтверждается ранее отмеченный факт тесной связи ширины зоны предельного состояния с параметром $\frac{\gamma H}{R_{сж}}$. Так, при $H = 400$ м и

$R_{сж} = 20$ МПа $\left(\frac{\gamma H}{R_{сж}} = 0,5\right)$ интервал изменения ширины зоны составляет

$(0,51...0,65)r_g$; при $H = 200$ м и $R_{сж} = 10$ МПа $\left(\frac{\gamma H}{R_{сж}} = 0,5\right)$ ширина зоны изменяется незначительно – $(0,47...0,65)r_g$. При разных соотношениях модулей деформации породных слоев отклонения не превышают 16,1% (вариант №1).

Оценка ширины зоны предельного состояния в боках выработки произведена на участке по высоте стоек рамной крепи. Если брать всю высоту выработки, то геометрия зоны будет иметь более сложную форму. Кроме того, на форму зоны предельного состояния пород будет влиять учет разных прочностных характеристик для отдельных слоев пород по высоте выработки. Учесть эти факторы возможно при моделировании геомеханических процессов в окрестности пластовой выработки с применением полной диаграммы деформирования породы [135, 137], то есть с учетом стадий ее разупрочнения и разрыхления, так как в зоне предельного состояния механические свойства породы меняются.

6.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ В КРЕПИ ВЫРАБОТКИ

Рамная крепь имеет максимумы приведенных напряжений σ в замке свода и стойках, причем последние, как правило, большие. Общая тенденция с ростом глубины расположения выработки – это практически линейное увеличение приведенных напряжений. Исключение составляют варианты №7 и №8, которые характеризуются общей закономерностью резкого снижения интенсивности роста σ при $H > 400$ м. Очевидно, это связано с повышенной жесткостью первого породного слоя кровли по отношению ко второму слою, когда повышение деформаций в массиве (с ростом H) реализуются в основном за счет податливости второго слоя, а первый жесткий слой ограничивает деформации, передающиеся на рамную крепь, и она воспринимает меньшую нагрузку.

Соотношение модулей деформации близлежащих породных слоев играют весьма существенное значение в плане распределения эпюры напряжений σ и величины их максимума. Наибольшая нагрузка на раму передается при пониженной жесткости всех слоев (вариант №1) и величина σ превышает расчетный предел текучести для стали Ст.5 ($\sigma_T = 270$ МПа). Меньшее на 4,5%, но также превышающая величину σ_T , приведенное напряжение наблюдается для варианта №10 расположения в непосредственной кровле и почве породных слоев пониженной жесткости. При наличии хотя бы одного породного слоя повышенной жесткости в непосредственной кровле или почве величина максимума σ снижается на 26,9...44,8%. Наибольшее снижение σ имеет место при повышенной жесткости всех близлежащих породных слоев (вариант №18): в 2,44 раза меньше по сравнению с вариантом №1.

Таким образом, выявлена существенная зависимость максимумов приведенных напряжений как от глубины расположения выработки, так и от соотношения модулей деформации близлежащих породных слоев.

6.5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОНЫ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД ВОКРУГ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ В ТОНКОСЛОИСТОМ МАССИВЕ СЛАБЫХ ПОРОД

На основе установленных закономерностей определены уравнения регрессии размеров зоны предельного состояния породного массива вблизи пластовой выработки от геомеханических параметров: глубины H расположения выработки, расчетного сопротивления пород сжатию $R_{сж}$, соотношения модулей деформации близлежащих породных слоев.

Для наглядности анализа построен ряд графиков для «разнополюсных» вариантов соотношений модулей деформации, а промежуточные варианты

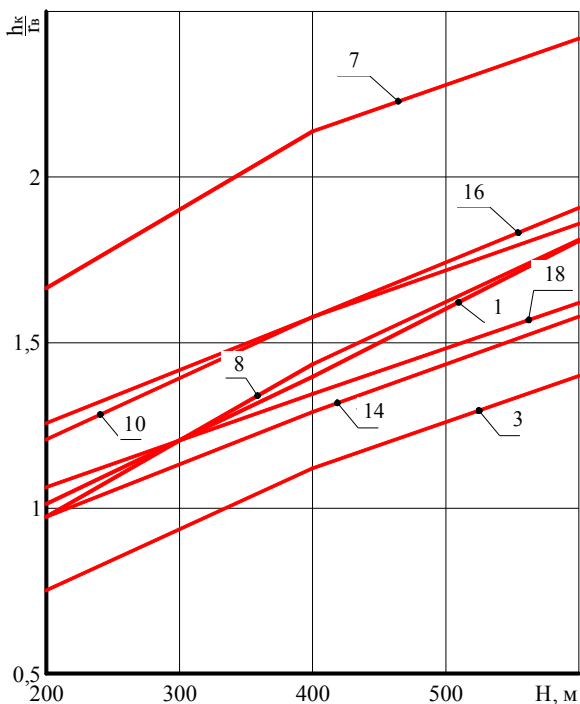


Рис. 6.25. Изменение относительной высоты $\frac{h_k}{r_e}$ зоны предельного состояния пород кровли с ростом глубины H разработки по вариантам (см. табл. 5.1): 1, 3, 7, 8, 10, 14, 16, 18

дисперсионного анализа позволило установить следующую зависимость (множественный коэффициент корреляции 0,733).

$$\frac{h_k}{r_e} = 0,54 + 0,42 \cdot 10^{-4} \left(E_2^K - 0,3 \cdot 10^4 \right) + \\ + H \left[2,03 \cdot 10^{-3} + 0,32 \cdot 10^{-7} \left(0,9 \cdot 10^{-4} - E_1^H - E_1^K - E_2^K \right) \right]. \quad (6.1)$$

В формуле (6.1) и далее глубина расположения выработки изменяется в интервале $H = 200 \dots 600$ м и подставляется в метрах; модули деформации близлежащих породных слоев изменяются в диапазоне $(0,3 \dots 1) \cdot 10^4$ МПа и подставляются в МПа.

попадают в интервал вариации исследуемого параметра и использованы для построения уравнений регрессии. На рис. 6.25 приведены установленные зависимости относительной высоты $\frac{h_k}{r_e}$

зоны предельного состояния пород кровли от глубины H разработки для различных вариантов соотношений модулей деформации близлежащих породных слоев. Здесь и далее вариант №7 расположения одновременно в непосредственной кровле и почве породных слоев повышенной жесткости не учтен как нехарактерный для углевещающей толщи Западного Донбасса. Как видно, зависимость параметра $\frac{h_k}{r_e}$ от глубины H

близка к линейной, что и подтвердил критерий Фишера [159-161]. Применение методов корреляционно-

дисперсионного анализа позволило установить следующую зависимость (множественный коэффициент корреляции 0,733).

В почве выработки относительная глубина зоны предельного состояния $\frac{h_{II}}{r_e}$

также имеет практически линейную связь с глубиной разработки (рис. 6.26). При этом колебания глубины зоны, вызванные изменением модулей деформации породных слоев, заметно меньше, чем в кровле.

Для определения глубины зоны предельного состояния пород почвы получена следующая корреляционная зависимость (множественный коэффициент корреляции – 0,881)

$$\frac{h_{II}}{r_e} = 0,88 + H \left[1,23 \cdot 10^{-3} + 0,57 \cdot 10^{-7} (0,3 \cdot 10^4 - E_1^{II}) \right]. \quad (6.2)$$

Ширина зоны $\frac{h}{r_e}$ предельного

состояния пород в боках выработки помимо указанных ранее параметров зависит также от расчетного сопротивления породы на сжатие $R_{сж}$.

Исследования показали практически линейную связь $\frac{h}{r_e}$ с

параметром $-\frac{\gamma H}{R_{сж}}$ (рис. 6.27).

Причем (за исключением варианта №7) величина модулей деформации близлежащих породных слоев оказывает относительно небольшое влияние на ширину зоны предельного состояния пород боков выработки и закономерностей связи $\frac{h}{r_e}$ с моду-

лями деформации породных слоев не прослеживается. Поэтому по результатам анализа эпюр приведенных напряже-

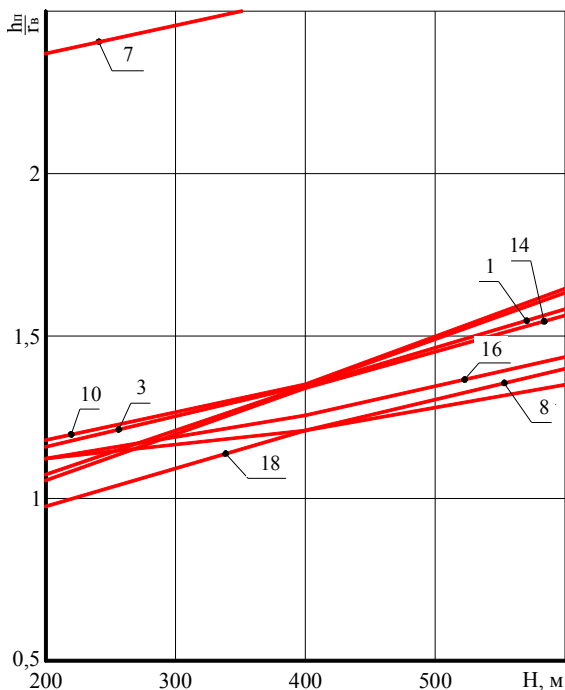


Рис. 6.26. Изменение относительной глубины $\frac{h_{II}}{r_e}$ зоны предельного состояния пород почвы с ростом глубины H разработки по вариантам (см. табл. 5.1): 1, 3, 7, 8, 10, 14, 16, 18

ний приняты усредненные значения $\frac{h}{r_e}$ при фиксированном показателе

$\frac{\gamma H}{R_{сжс}}$. В итоге получено следующее уравнение регрессии (множественный коэффициент корреляции – 0,907)

$$\frac{h_{\bar{b}}}{r_e} = -0,34 + 1,92 \frac{\gamma H}{R_{сжс}} . \quad (6.3)$$

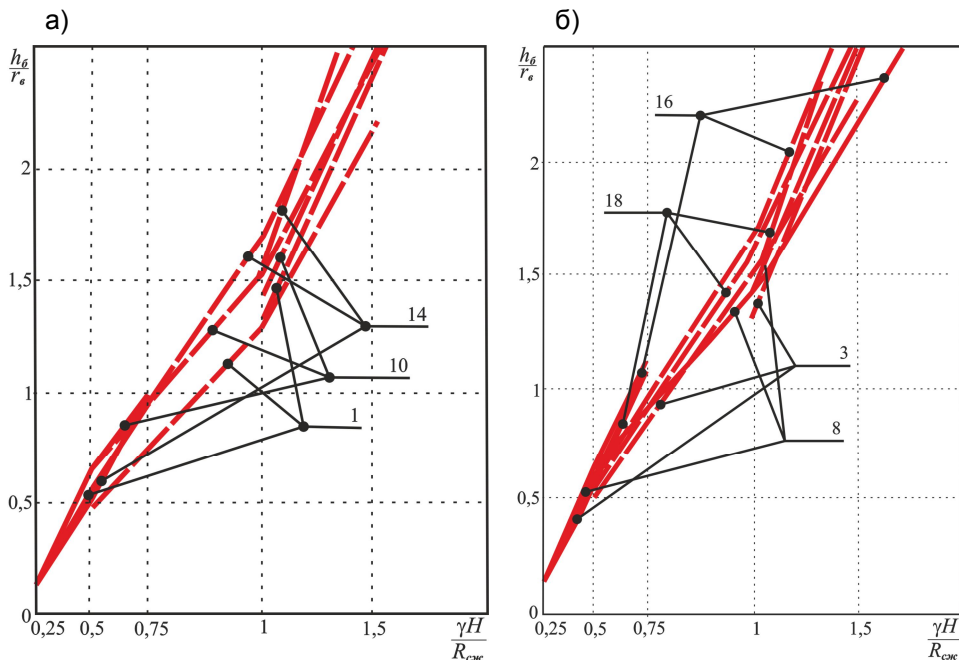


Рис. 6.27. Изменение относительной ширины $\frac{h_{\bar{b}}}{r_e}$ зоны предельного состояния

пород боков выработки с ростом параметра $\frac{\gamma H}{R_{сжс}}$

при $R_{сжс} = 5, 10, 20$ МПа по вариантам (см. табл. 5.1): 1, 3, 8, 10, 14, 16, 18

Таким образом, определены закономерности изменения размеров зоны предельного состояния пород в окрестности пластовой выработки, пройденной в слабом слоистом массиве в условиях Западного Донбасса. Форма этой зоны зависит от глубины разработки H и расчетного предела прочности породы на сжатие $R_{сжс}$: при глубине $H \leq 400$ м и $R_{сжс} \geq 10$ МПа форма зоны вытянута по вертикальной оси Y ; при $H > 400$ м и $R_{сжс} < 10$ МПа форма зоны вы-

тянута по горизонтальной оси X .

Что касается рамной крепи, то закономерности изменения максимумов приведенных напряжений с ростом глубины разработки показаны на рис. 6.28 и имеют общую тенденцию к увеличению σ .

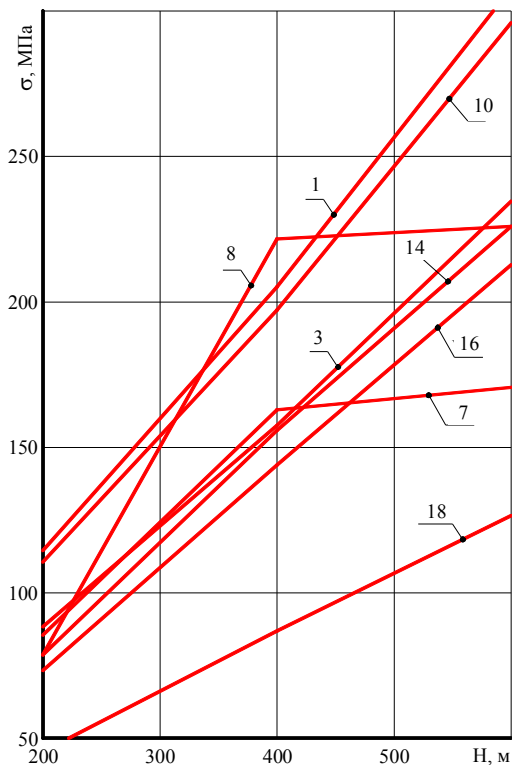


Рис. 6.28. Изменение максимума приведенных напряжений σ в рамной крепи с ростом глубины H разработки по вариантам (см. табл. 5.1): 1, 3, 7, 8, 10, 14, 16, 18

ВЫВОДЫ

По результатам исследований, изложенных в разделе 2, сформулирован ряд выводов.

1. Для условий Западного Донбасса обоснован весь комплекс исходных геомеханических и горнотехнических параметров для максимально достоверного моделирования процессов деформирования неоднородного углевмещающего тонкослоистого породного массива в окрестности пластовой выработки. Размеры модели выбраны с учетом несущественного влияния выработки на ее границах, где выполняются исходные негидростатические условия распределения вертикальных σ_y и горизонтальных

σ_x компонент напряжений. Доказано, что при слабых связях между соседними слоями действующие касательные напряжения τ_{xy} их разрушают и породные слои деформируются по плоскостям напластования как независимая друг от друга система. Этот фактор существенно изменяет поле напряжений и учтен в разрабатываемой модели.

Проведенное тестирование модели на предмет соответствия результатов расчета классическим представлениям о механизме сдвижения слоистого массива в окрестности выработки подтвердили возможность её использования для изучения геомеханических процессов в системе «массив-крепь».

2. Для условий Западного Донбасса по стратиграфическим колонкам рабочих угольных пластов построено три наиболее характерных структуры уг-

левмещающей толщи, анализ поля напряжений в которых позволил с достаточной для горнотехнических расчетов точностью обосновать единую усредненную структуру, погрешность которой не превышает 10% во всем диапазоне изменения геомеханических параметров вмещающего массива.

3. Оценено влияние деформационных характеристик близлежащих к пластовой выработке породных слоев на напряженно-деформированное состояние системы «массив-крепь». Установлено, что несмотря на различные соотношения деформационных характеристик близлежащих породных слоев в кровле и почве пластовой выработки размеры зон предельного состояния (в основном от действия растягивающих напряжений σ_x и σ_y) достаточно стабильны и охватывают два породных слоя в кровле и один слой в почве. В боках штрека наблюдается ярко выраженная область опорного давления, которое способствует развитию зоны предельного состояния от действия сжимающих напряжений.

Максимумы приведенного напряжения σ в рамной крепи, определяющие ее несущую способность, существенным образом зависят от соотношения модулей деформации близлежащих породных слоев: снижение σ происходит в случае залегания в непосредственной кровле хотя бы одного породного слоя повышенной жесткости.

4. Установлены закономерности и получены уравнения регрессии связи размеров зоны предельного состояния неоднородного слоистого массива в окрестности пластовой выработки с глубиной ее расположения, расчетной прочностью породы на сжатие и модулями деформации породных слоев. Установлено, что влияние модулей деформации породных слоев на размеры зоны предельного состояния распространяется до 20...25% при диапазоне изменения, характерном для условий Западного Донбасса.

5. На напряженное состояние рамной крепи деформационные характеристики породных слоев оказывают более существенное влияние, превышающее иногда 100%.

7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛНЫХ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ «МАССИВ-КРЕПЬ»

Полная диаграмма деформирования горной породы (рис. 7.1) в соответствии с общепринятыми допущениями представлена в виде трех линейных участков [135-137]: ОА – упруго-пластическая стадия деформирования, точка А – предельное состояние, АВ – стадия разупрочнения, БВ – разрыхление на стадии «руинного» разрушения. Такая диаграмма характеризуется четырьмя параметрами: $\sigma_{сж}$ – предел прочности на одноосное сжатие ненарушенной породы, $\sigma_{сж}^o$ – остаточная прочность породы на сжатие (на стадии «руинного» разрушения), E – модуль деформации породы, M – модуль спада.

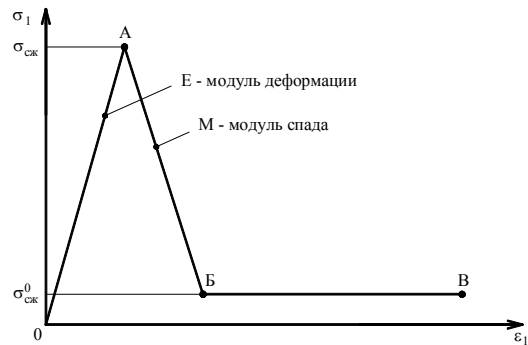


Рис. 7.1. Идеализация полной диаграммы деформирования породы

С учетом того, что в модель входит угольный пласт и пять породных слоев, для каждого из которых необходимо варьировать четырьмя параметрами, исследования по выявлению закономерностей изменения НДС системы представляются чрезвычайно громоздкими. Поэтому сделаны два ограничения по результатам исследований [135] за предельного деформирования алевролита, отобранного на шахте им. Сташкова в Западном Донбассе. Во-первых, замеренное отношение

$$\frac{\sigma_{сж}^o}{\sigma_{сж}} = 0,12...0,23 ; \text{ поэтому с некоторым запасом прочности в расчетах приня-}$$

то постоянное отношение $\frac{\sigma_{сж}^o}{\sigma_{сж}} = 0,1$. Во-вторых, замеренное отношение

$$\frac{M}{E} \approx 1,3, \text{ которое принято постоянным на данном этапе расчетов НДС систе-}$$

мы «массив-крепь».

В предыдущих разделах приведены результаты исследований и детально проанализированы 27 вариантов соотношения модулей деформации породных слоев углевмещающей толщи. Поэтому, с целью сокращения количества расчетов в исследовании предельного и за предельного состояния

принято восемь наиболее «разнополюсных» вариантов: №№ 1,3,7,8,10,14,16 и 18 из табл. 5.1.

Интервал изменения предела прочности породы на одноосное сжатие выбран на основе рекомендаций [144-146, 157] по расчету параметров поддержания горных выработок, которые разработаны на базе обширных и многолетних экспериментальных исследований во всех регионах Донбасса и, на наш взгляд, наиболее достоверно отражают геомеханические условия эксплуатации горных выработок.

На шахтах Западного Донбасса глубина заложения горных выработок изменяется [144] от 140 м (ш. «им. Сташкова», «Павлоградская», «Благодатная») до 585 м (ш. «Западно-Донбасская»). К настоящему времени на верхних горизонтах шахт уже закончили или заканчивают отработку угольных пластов, поэтому интервал исследований по глубине расположения пластовых выработок принят $200 \text{ м} \leq H \leq 600 \text{ м}$.

Расчетное сопротивление породы сжатию $\sigma_{сж}$ в массиве отличается от такого значения в образце $\sigma_{сж}^{об}$ и согласно методике [157] определяется по формуле

$$\sigma_{сж} = K_1 \cdot K_2 \cdot \sigma_{сж}^{об}, \quad (7.1)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий дополнительную нарушенность массива поверхностями ослабления; согласно [145, 146, 157] $K_1 = 0,4 \dots 0,6$ для углевмещающих пород Западного Донбасса, характеризующихся средним расстоянием между поверхностями ослабления, изменяющимся в интервале $0,1 \dots 1 \text{ м}$;

K_2 – коэффициент, учитывающий разупрочнение обводненных пород; согласно рекомендациям [145, 146, 157] для углевмещающих пород (аргиллиты, глинистые алевролиты и песчаники) Западного Донбасса $K_2 = 0,5 \dots 0,6$.

Таким образом, с учетом основных ослабляющих факторов расчетная прочность пород Западного Донбасса на сжатие в массиве по сравнению с пределом прочности породы на сжатие в образце составляет

$$\sigma_{сж} = (0,20 \dots 0,36) \sigma_{сж}^{об}. \quad (7.2)$$

Многочисленные исследования величины $\sigma_{сж}^{об}$ для углевмещающих пород Западного Донбасса систематизированы в документе [157] по всем шахтам ОАО «Павлоградуголь» и установлено, что среднее значение изменяется в пределах от 10,5 МПа (ш. «Павлоградская») до 28 МПа (ш. «Степная») при вариации $\sigma_{сж}^{об}$ от 6 МПа (ш. им. Героев Космоса) до 55 МПа (ш. «Степная»). Тогда расчетный предел прочности на сжатие в массиве для пород Западного Донбасса изменяется в пределах $\sigma_{сж} = 1,2 \dots 19,8 \text{ МПа}$. Данный ин-

тервал вариации $\sigma_{сж}$ довольно широк и для детального изучения его влияния на НДС углевмещающей породной толщи исследования предельного (запредельного) состояния системы проведены на первом этапе для интервала $\sigma_{сж} = 5...20$ МПа.

Учитывая приведенные выше факторы, на первом этапе расчеты выполнены по 27 вариантам соотношений прочности на сжатие близлежащих породных слоев, которые приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

**ВАРИАНТЫ РАСЧЕТНОГО ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ
НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ БЛИЗЛЕЖАЩИХ ПОРОДНЫХ
СЛОЕВ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕЙ ТОЛЩИ**

Вариант	$(\sigma_{сж}^I)_1$ МПа	$(\sigma_{сж}^K)_1$ МПа	$(\sigma_{сж}^K)_2$ МПа	Вариант	$(\sigma_{сж}^I)_1$ МПа	$(\sigma_{сж}^K)_1$ МПа	$(\sigma_{сж}^K)_2$ МПа	Вариант	$(\sigma_{сж}^I)_1$ МПа	$(\sigma_{сж}^K)_1$ МПа	$(\sigma_{сж}^K)_2$ МПа
1	5	5	5	10	5	5	20	19	5	20	10
2	5	10	5	11	10	5	20	20	10	20	10
3	5	20	5	12	10	10	20	21	20	20	10
4	10	10	5	13	5	10	20	22	5	5	10
5	20	10	5	14	5	20	20	23	10	5	10
6	10	20	5	15	10	20	20	24	20	5	10
7	20	20	5	16	20	5	20	25	5	10	10
8	20	5	5	17	20	10	20	26	10	10	10
9	10	5	5	18	20	20	20	27	20	10	10

Второй породный слой почвы и третий слой кровли также моделируются полной диаграммой деформирования породы, но с постоянным пределом прочности породы на одноосное сжатие $(\sigma_{сж}^I)_2 = (\sigma_{сж}^K)_3 = 10$ МПа. Такое допущение обусловлено относительно небольшим влиянием (до 10%) прочностных характеристик крайних породных слоев модели на величину смещения породного контура пластовой выработки. Это объясняется тем, что зоны предельного состояния в почве и кровле выработки, как правило, локализируются в близлежащих породных слоях и не затрагивают крайние породные слои модели.

Угольный пласт также моделируется по полной диаграмме деформирования (см. рис. 7.1) при исходных параметрах $\sigma_{сж}^y = 30$ МПа, $E^y = 0,35 \cdot 10^4$ МПа [144].

Рамная крепь испытывает весьма значительные деформации по всему контуру. Поэтому смоделирована реальная диаграмма поведения стали Ст5, учитывающая площадку текучести при наступлении предельного состояния $\sigma = \sigma_T = 270$ МПа, а также стадию упрочнения металла до величины $\sigma = \sigma^B = 500 \dots 620$ МПа (здесь обозначено через σ_T и σ^B соответственно, предел текучести и временное сопротивление на разрыв стали Ст.5, из которой обычно изготавливается рамная крепь из спецпрофиля СВП [150, 151]).

В качестве межрамного ограждения для пластовых выработок используется преимущественно железобетонная затяжка с механическими характеристиками [150]: $\sigma_{сж}^3 = 20$ МПа, $E^3 = 2 \cdot 10^4$ МПа.

Особенности ее предельного и запрельного деформирования заключаются в том, что она испытывает свободный прогиб в полость выработки на участке между двумя соседними рамами. Поэтому при наступлении предельного состояния $\sigma = \sigma_{сж}^3$ происходит ее разрушение

в районе срединного сечения пролета, развиваются значительные перемещения затяжки в полость выработки и она существенно теряет свою несущую способность. В связи с этим, на наш взгляд, целесообразно моделировать запрельное деформирование затяжки также полной диаграммой (см. рис. 7.1), но с двумя особенностями: модуль спада ее материала стремится к бесконечности, $(\sigma_{сж}^0)^3 = 0$.

Последним моделируемым элементом системы «массив-крепь» является закрепное пространство, заполненное разрушенной породой – забутовкой. Механические характеристики разрушенной и уплотняемой (за счет прояв-

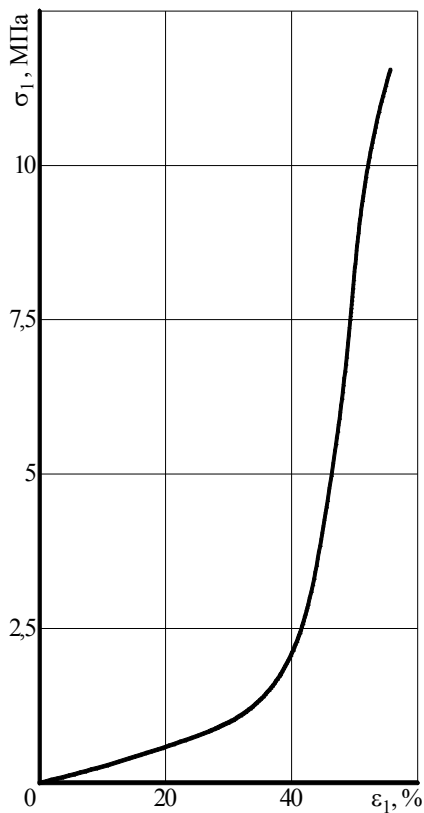


Рис. 7.2. Диаграмма деформирования забутовочного материала в закрепном пространстве пластовой выработки

лений горного давления) горной породы коренным образом изменяются и для их оценки целесообразно использовать экспериментальные данные по нагружению охранных бутовых полос в ОАО «Павлоградуголь», имеющих подобную закрепному пространству структуру и условия стесненного деформирования [152]. По результатам шахтных экспериментов данной работы построена реальная диаграмма нагружения бутовой полосы (рис. 7.2), по которой пошагово производится расчет НДС забутованного закрепного пространства для условий шахт ОАО «Павлоградуголь».

В заключении следует отметить, что, поскольку моделирование полных диаграмм деформирования элементов системы «массив-крепь» предполагает «пошаговый» расчет сетки конечных элементов, то глубина расположения пластовой выработки изменяется плавно в интервале $200 \text{ м} \leq H \leq 600 \text{ м}$, что позволяет более четко определять горно-геологические условия перехода вмещающих выработку пород в предельную и запредельную стадии деформирования.

8. ВЛИЯНИЕ НА НДС СИСТЕМЫ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОДНЫХ СЛОЕВ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕЙ ТОЛЩИ

Анализ тенденций изменения поля напряжений и деформаций в системе «массив-крепь» при разной величине предела прочности близлежащих породных слоев на одноосное сжатие проведен на примере глубины разработки угольного пласта $H = 400$ м, которая наиболее часто встречается в настоящее время в Западном Донбассе.

Рассмотрен вариант №1 (см. табл. 5.1), в котором модуль деформации всех близлежащих породных слоев одинаков и имеет минимальное значение $E_i^{K,П} = 0,3 \cdot 10^4$ МПа.

8.1. АНАЛИЗ ЭПЮР ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Наиболее важной для Западного Донбасса составляющей оценки устойчивости пластовых выработок – величина пучения пород почвы. Картина сдвижения углевмещающей толщи в полость выработки представлена на векторной эпюре полных перемещений (рис. 8.1), направление которых задано соответствующей стрелкой, а величина определяется длиной этой стрелки. Следует отметить качественное соответствие полученной векторной эпюры с представлениями, развитыми в работах [162, 163]:

– во-первых, четко прослеживается механизм так называемого «выдавливания» пород почвы выработки за счет действия опорного давления в ее боках;

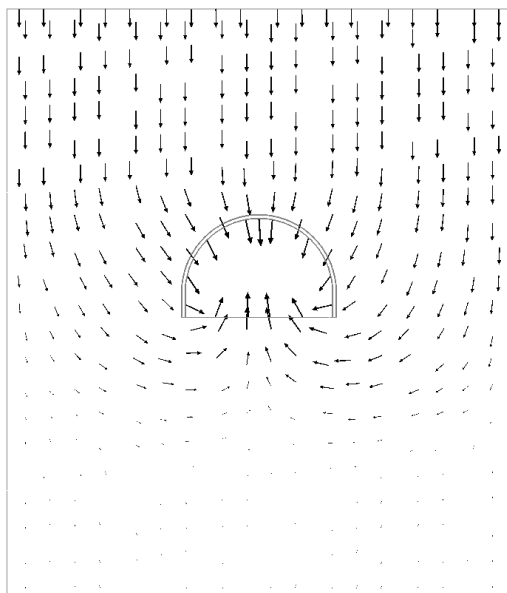


Рис. 8.1. Векторное представление эпюры полных перемещений углевмещающих породных слоев в окрестности пластовой выработки

– во-вторых, в почве пласта, в том числе и под стойками рамной крепи, происходит интенсивное перемещение породы в плоскости напластования, что приводит к деформированию стоек рамы и снижению ее устойчивости;

– в-третьих, максимальное перемещение почвы в полость выработки имеет место в ее центральной части, что и наблюдается на практике;

– в-четвертых, процесс пучения распространяется на глубину, существенно превышающую технологически приемлемую длину анкеров, так что закрепить замки анкеров в устойчивых породах почвы не представляется возможным и требуется новый подход к оценке устойчивости почвы.

Таким образом, исследуемая модель качественно отражает геомеханические процессы пучения почвы в пластовой выработке, пройденной в слабом слоистом массиве.

В первую очередь проанализировано влияние прочностных характеристик $\sigma_{сж}$ и $\sigma_{сж}^0$ полной диаграммы деформирования близлежащих породных слоев на величину вектора их полного перемещения (см. рис. 8.1).

На глубине расположения пластовой выработки $H = 400$ м в предельное и запредельное состояние (по критерию $\sigma \geq \sigma_{сж}$) могут переходить как породные слои в целом, так только некоторые их области. Это обуславливает наличие как общих (независимо от величины $\sigma_{сж}$), так и отличительных черт в эпюрах полных перемещений системы «массив-крепь» (рис. 8.2 и рис. 8.3).

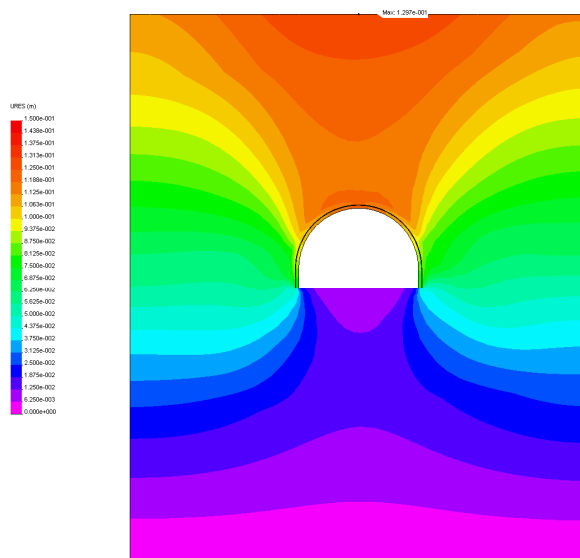
Общие черты эпюр полных перемещений сводятся к следующему:

– вертикальные перемещения в кровле выработки изменяют направление в ее боках в пределах $40^\circ \dots 60^\circ$ к плоскости напластования, а в почве штрека направление перемещений изменяется от 0° под опорами стоек рамы до 90° в районе вертикальной оси выработки; как будет показано ниже активизация процесса пучения почвы выработки происходит при переходе значительного объема пород (особенно породных слоев почвы пласта) в запредельное состояние на стадии разрыхления;

– процесс перемещения породы в полость выработки затрагивает и второй породный слой почвы пласта, расположенный на глубине пяти метров от него; поэтому пучение почвы выработки нельзя рассматривать как локальное явление в приконтурных породах, нейтрализация которого должна осуществляться методами управления НДС системы «массив-крепь» в направлении его минимизации;

– качественные картины эпюр перемещений подобны: во втором и третьем породных слоях кровли происходят практически вертикальные перемещения массива, которые затрагивают и первый слой кровли пласта, но только в центральной области свода выработки и на границе модели; в промежутке между этими областями происходит изменение направления перемещения пород первого слоя кровли, которое интенсифицируется в угольном

а)



б)

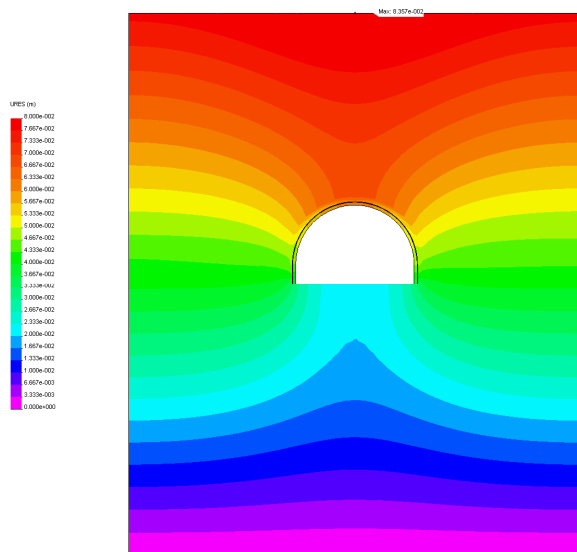
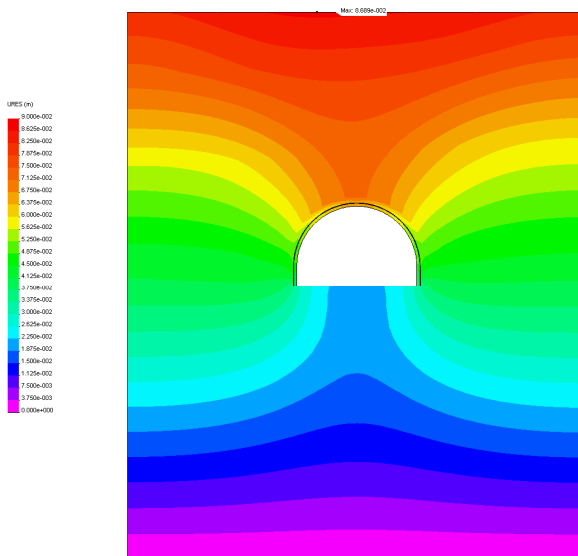


Рис. 8.2. Эпюры полных перемещений породных слоев в модели на глубине $H = 400$ м для вариантов прочностных характеристик породных слоев углевещающей толщи: а) №1; б) №18

а)



б)

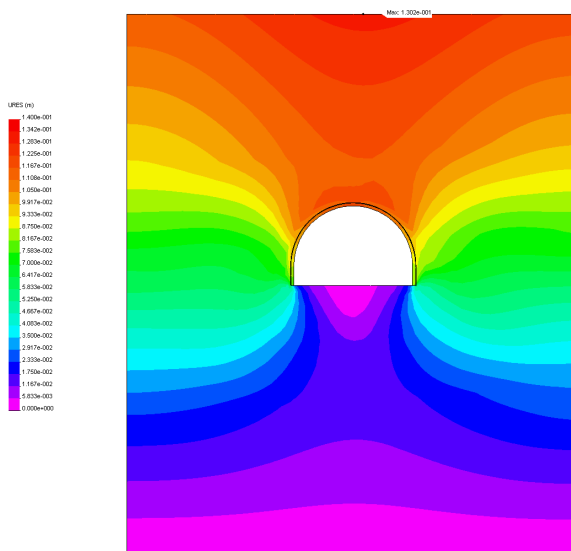


Рис. 8.3. Эпюры полных перемещений породных слоев в модели на глубине $H = 400$ м для вариантов прочностных характеристик породных слоев углекисляющей толщи: а) №7; б) №10

пласте и в породных слоях почвы за пределами вертикальных границ выработки и приближается к горизонтальному; в боках выработки возникает подобие полуэллипсов эпюр перемещений с большей осью, вытянутой в плоскости напластования; в почве пласта качественная эпюра перемещений (хотя гораздо меньшей величины) в значительной степени является «зеркальным» отображением относительно угольного пласта перемещений в кровле, но преимущественно вертикальная направленность в полость выработки имеет место только в районе ее вертикальной оси.

Анализ эпюр полных перемещений в модели выявил и отличительные черты, связанные с разными прочностными характеристиками (табл. 7.1) близлежащих породных слоев углевмещающей толщи:

– величина перемещений в своде выработки (преимущественно перпендикулярное направление к плоскости напластования) тем больше, чем меньше предел прочности породных слоев на одноосное сжатие. Так, в варианте №1 ($\sigma_{сж} = 5$ МПа для всех близлежащих породных слоев, см. табл. 7.1) величина смещений составляет $U = 960...1310$ мм, тогда как в варианте №18 ($\sigma_{сж} = 20$ МПа), $U = 160...260$ мм. Также обращает внимание некоторое влияние (на глубине разработки 400 м) прочностных характеристик второго пласта кровли: при увеличении в четыре раза $\left(\sigma_{сж}^K\right)_2$ (с 5 МПа до 20 МПа) в варианте №10 по сравнению с вариантом №1 смещения снизились до 740...930 мм; в диаметрально противоположном варианте №7, когда $\left(\sigma_{сж}^K\right)_2$ снижается в четыре раза с 20 МПа до 5 МПа (по сравнению с вариантом №18), смещения в кровле штрека увеличиваются на 31...33%;

– величина перемещений в боках выработки (по высоте стойки рамы направление перемещений составляет $40^\circ...60^\circ$ к плоскости напластования) существенным образом зависит от прочностных характеристик только первых слоев кровли и почвы пласта. При сравнении граничных вариантов №1 и №18 ($\sigma_{сж}$ увеличивается в четыре раза) полное смещение в боках выработки снижается в 4,75...5,91 раза. Влияние $\left(\sigma_{сж}^K\right)_2$ в исследуемом диапазоне не превышает 17,5%;

– в почве выработки в ее центральной части смещения (преимущественно перпендикулярные к плоскости напластования) не превышают 63 мм (вариант №18) и 1050 мм (вариант №1) при $H = 400$ м;

– смещения породы в районе опор стоек рамы имеют направление, практически совпадающее с плоскостью напластования, и в меньшей степени зависят от прочностных характеристик породных слоев непосредственной кровли. Величина смещений в варианте №1 в 2,9...4,1 раза выше, чем в варианте №18, где прочностные характеристики слоев увеличены в четыре раза. Влияние второго породного слоя кровли по-прежнему мало и не превышает 23,5%.

Из проведенного анализа влияния прочностных характеристик близлежащих слоев (на глубине 400 м) на величину смещений породного контура пластового штрека следует основной вывод о преимущественном влиянии на смещения породного контура выработки прочностных характеристик первых породных слоев кровли и почвы пласта и весьма умеренном влиянии прочностных характеристик второго породного слоя кровли.

8.2. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕГО ПОРОДНОГО МАССИВА

Анализ влияния прочностных характеристик близлежащих породных слоев на напряженное состояние углевмещающего массива проведен по компонентам σ_y, σ_x и σ . Эпюры вертикальных напряжений в предельном и за-предельном состояниях во многом схожи с подробно описанными ранее эпюрами в допредельном состоянии элементов системы «массив-крепь», поэтому основное внимание уделено компонентам σ_x и σ .

Основные особенности влияния прочностных характеристик близлежащих породных слоев (глубина разработки 400 м) на эпюру распределения горизонтальных напряжений сводятся к следующему.

Первая наиболее характерная особенность заключается в более однородном распределении σ_x при пониженной прочности близлежащих породных слоев (вариант №1, табл. 7.1) по сравнению с весьма неравномерным полем σ_x при повышенной прочности углевмещающего массива в варианте №18 (рис. 8.4). На наш взгляд, это связано с тем, что в варианте №1 близлежащие породные слои кровли и почвы пласта практически полностью находятся в предельном (запредельном) состоянии, когда повышенная деформационная способность породы сглаживает локальные концентрации напряжений и нивелирует зоны разгрузки и опорного давления. В варианте №18 лишь некоторая часть пород, в основном, в зоне опорного давления, примыкающей к бокам выработки, переходит в предельное состояние. Поэтому здесь характерны значительные перепады σ_x , выявленные ранее при исследовании допредельного состояния системы.

В количественном плане изложенная особенность имеет такие параметры. В варианте №1 в породах кровли и почвы (в подавляющей части объема модели) диапазон изменения σ_x составляет 7,5...9,2 МПа и вся эта область испытывает напряжения сжатия. Величина σ_x также косвенно указывает на переход близлежащих породных слоев в предельное состояние, поскольку отношение

$\frac{\sigma_x}{\gamma H}$ приближается к единице (то есть, гидростатическому напряженному состоянию), тогда, как исходное состояние модели задано негидростати-

ческим ($\frac{\sigma_x}{\gamma H} = \frac{1}{3}$, $\mu_i^{K,II} = 0,25$). Следовательно, моделирование полных диаграмм деформирования породы (см. рис. 7.1) обеспечивает автоматический учет известного факта [135, 140] изменения коэффициента поперечной деформации при переходе породы в предельное и запредельное состояние. В почве выработки имеется зона относительно пониженных сжимающих напряжений $\sigma_x = 5,5 \dots 6$ МПа. Но, эта зона, во-первых, весьма ограничена с максимальной глубиной по центру выработки до $0,65 r_g$, а, во-вторых, порода в ней все равно находится в предельном состоянии от действия исключительно сжимающих напряжений. Второй факт следует особо отметить, поскольку он провоцирует интенсивное пучение почвы выработки. В этом же первом породном слое почвы под опорами стоек рамной крепи и в области контакта с угольным пластом на расстоянии $(1 \dots 1,5) r_g$ от стоек наблюдается повышенная концентрация $\sigma_x \geq 10$ МПа, свидетельствующая о запредельном состоянии данных областей с интенсивным разрыхлением породы, перемещающейся в плоскости напластования в полость выработки. Приведенная особенность также способствует развитию процесса пучения пород почвы выработки.

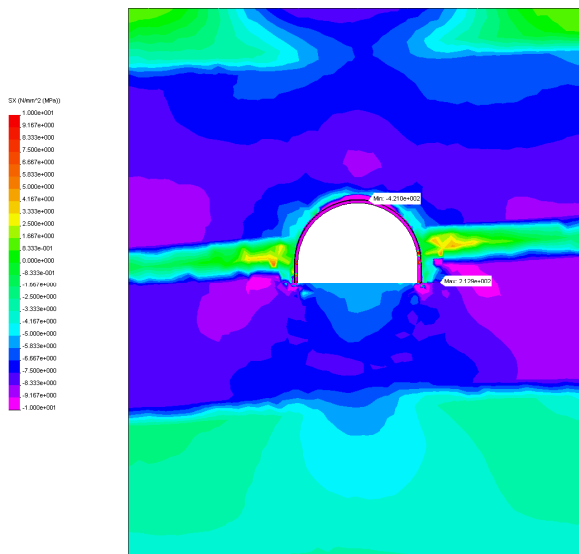
Угольный пласт имеет гораздо более высокие прочностные характеристики ($\sigma_{сж}^y = 30$ МПа) поэтому он по большей части объема находится в допредельном состоянии с небольшими сжимающими напряжениями $\sigma_x = 1 \dots 3$ МПа. Растягивающие напряжения σ_x появляются в боках выработки на расстоянии $(1 \dots 1,5) r_g$, а их величина $(2,5 \dots 5,5)$ МПа указывает на некоторую степень разупрочнения угля от действия растягивающих напряжений. Данный факт может быть объяснен интенсивным изгибом части угольного пласта, примыкающего к выработке, за счет косонаправленного (по отношению к плоскости напластования) перемещения породных слоев кровли и почвы в боках штрека.

Второй породный слой почвы и третий слой кровли испытывает в основном сжимающие напряжения на уровне исходного негидростатического состояния $\sigma_x = \frac{1}{3} \gamma H = 3,33$ МПа ($H = 400$ м). Лишь в районе почвы и выработки по их ширине наблюдается некоторая концентрация σ_x до $5 \dots 7$ МПа.

В варианте №18 повышенной прочности близлежащих породных слоев эпюра σ_x имеет существенные отличия от варианта №1 (см. рис. 8.4):

– основной объем близлежащих породных слоев кровли и почвы находится под действием сжимающих $\sigma_x = 3 \dots 4$ МПа, близких к исходному негидростатическому состоянию. Некоторая концентрация сжимающих σ_x до 5 МПа наблюдается в почве выработки на глубине $(1,2 \dots 2,5) r_g$ и в кровле штрека на высоте $(0,8 \dots 3) r_g$ в центральной части его ширины $(0,7 \dots 1,0) r_g$;

а)



б)

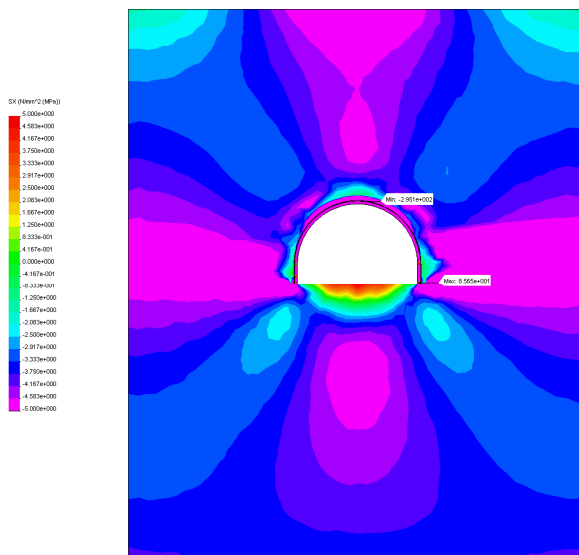
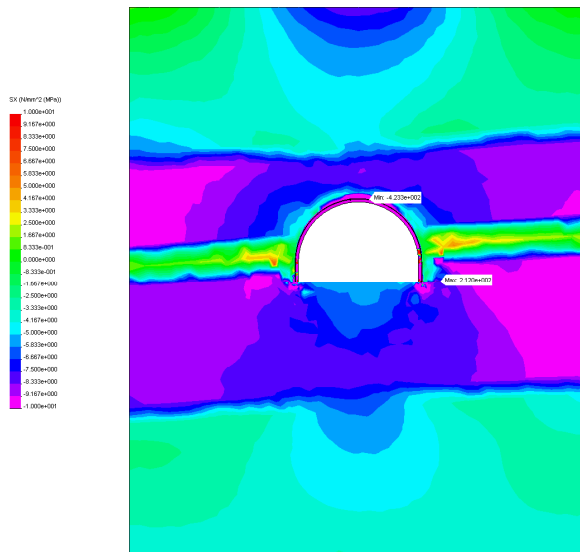


Рис. 8.4. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x ($H = 400$ м) в углевещающей толще для вариантов прочностных характеристик породных слоев: а) №1; б) №18

а)



б)

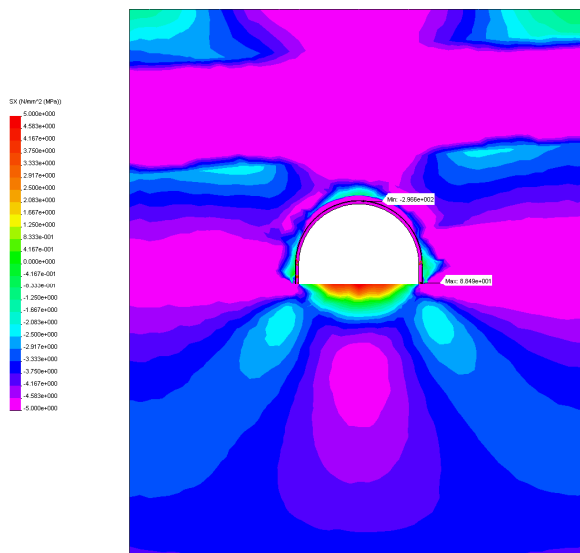


Рис. 8.5. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x ($H = 400$ м)
в углевещающей толще для вариантов прочностных
характеристик породных слоев: а) №10; б) №7

– в непосредственной почве выработки на глубину до $0,6r_g$ возникает область растягивающих σ_x с максимумом 5...7 МПа на ее поверхности. То есть, имеет место типичная эпюра σ_x в допредельном состоянии;

– угольный пласт более равномерно нагружен сжимающими σ_x на уровне исходного негидростатического состояния $\sigma_x = 0,54\gamma H$ ($\mu^y = 0,35$) [135].

Все приведенные особенности указывают на то, что подавляющий объем близлежащих породных слоев и угольного пласта находится в допредельном состоянии.

Для полноты оценки влияния σ_x близлежащих породных слоев на эпюру σ_x приведены на рис. 8.5 варианты №7 и №10, в которых в четыре раза изменяется величина $\sigma_{сж}$ второго породного слоя кровли по сравнению с первыми слоями кровли и почвы.

Если сравнивать попарно варианты №1 и №10, а также варианты №7 и №18, то во многом эпюры σ_x схожи, а отличия, на наш взгляд, не столь значительны.

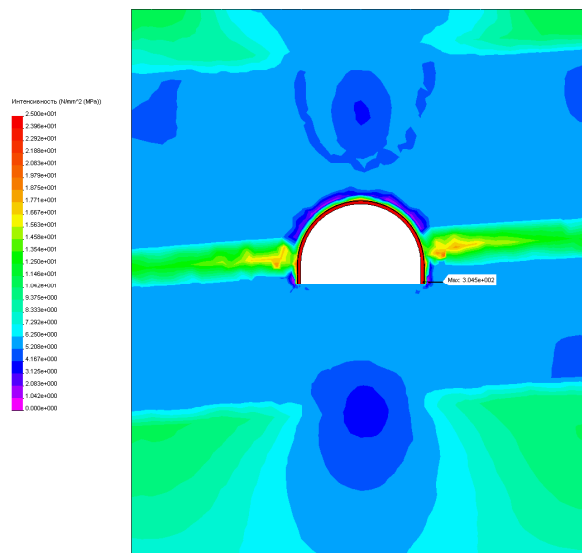
Во-первых, при сравнении вариантов №1 и №10 предел прочности на сжатие второго породного слоя увеличился в четыре раза до 20 МПа, поэтому он находится в основном в допредельном состоянии и его большая часть разгружена от горизонтальных напряжений: σ_x , как правило, не превышает начального негидростатического состояния за пределами вертикальных границ выработки и только в их пределах $\sigma_x > \frac{1}{3}\gamma H$. Четко прослеживается и другая закономерность, связанная с устойчивым состоянием второго породного слоя: повышенные до 9...12% сжимающие σ_x в первых породных слоях кровли и почвы; расширенные области растягивающих напряжений σ_x в угольном пласте.

Во-вторых, при сравнении вариантов №18 и №7 величина σ_x второго слоя кровли снизилась в четыре раза до 5 МПа и большая его часть переходит в предельное состояние, а остальная – приближается к нему. По этой причине величина σ_x во втором породном слое кровли превышает начальное негидростатическое состояние и смыкается с областью повышенных σ_x в первом слое кровли над выработкой.

Анализ эпюр приведенных напряжений σ при $H = 400$ м в зависимости от прочностных характеристик близлежащих породных слоев позволил установить следующее.

В варианте №1 (рис. 8.6, а), когда все близлежащие породные слои имеют $\sigma_{сж} = 5$ МПа, наблюдается практически повсеместный их переход в предельное (запредельное) состояние, а ограниченные области в кровле и почве

а)



б)

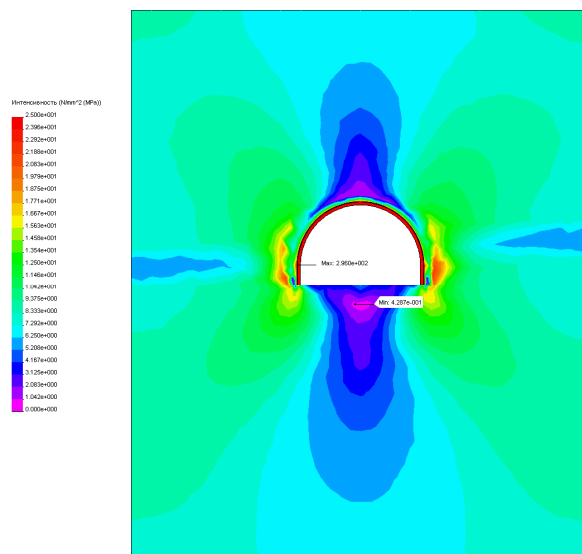


Рис. 8.6. Эпюры приведенных напряжений σ ($H = 400$ м)
в углевмещающей толще для вариантов прочностных
характеристик породных слоев: а) №1; б) №18

находятся в состоянии, близком к предельному. Остальные породные слои и угольный пласт имеют более высокие прочностные характеристики и обладают устойчивым (допредельным) состоянием.

В варианте №18 ($\sigma_{сж} = 20$ МПа) наблюдается в основном допредельная эпюра распределения σ , поскольку его величина, как правило, не превышает 20 МПа, за исключением ограниченных зон в боках выработки на расстоянии до $(0,4...0,5)r_g$, (рис. 8.6, б). Наиболее разгруженные области располагаются в кровле и почве выработки, причем в почве она обширнее.

В вариантах №7 и №10, когда величина $\sigma_{сж}$ второго породного слоя изменяется в четыре раза, эпюры σ весьма схожи за исключением того, что в варианте №7 второй слой кровли переходит в предельное состояние (по сравнению с вариантом №18), а в варианте №10, наоборот, второй слой кровли находится в устойчивом состоянии по сравнению с вариантом №1 (рис. 8.7).

Проведенный анализ эпюр σ_x и σ подтверждает ранее отмеченную особенность умеренного влияния прочностных характеристик второго породного слоя кровли на напряженное состояние первых породных слоев кровли и почвы, а также угольного пласта.

8.3. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАМНОЙ КРЕПИ

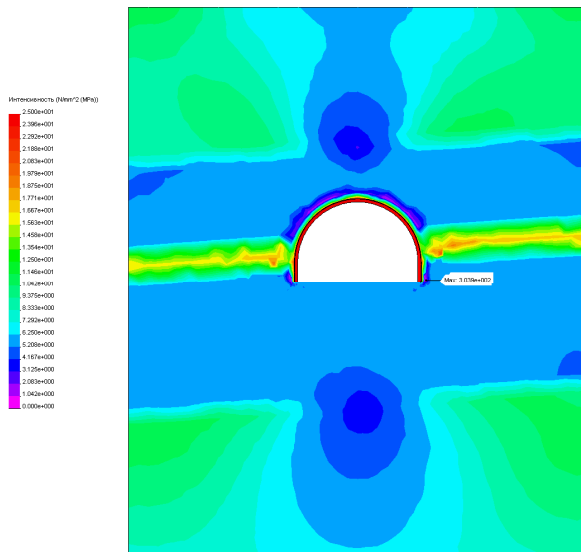
Обобщенная оценка состояния рамной крепи проведена по величине приведенных напряжений σ и их сравнении с полной диаграммой деформирования стали Ст.5 (применяемой для изготовления спецпрофиля СВП) с учетом площадки текучести и участка упрочнения стали до величины временного сопротивления σ^B [150, 151].

Для варианта №1 (см. табл. 7.1) пониженных прочностных характеристик всех близлежащих породных слоев наблюдается (рис. 8.8, а) достаточно однородная эпюра распределения σ по контуру рамы: интервал колебаний σ изменяется от 245 МПа до 278 МПа. Максимальное значение $\sigma = 305$ МПа имеет место на границе опоры стойки рамы с опорной плитой и обусловлено контактными напряжениями в весьма ограниченной области. Некоторое повышение σ происходит в замке свода рамы и в прямолинейной части ее стоек.

Такое достаточно равномерное распределение σ объясняется, на наш взгляд, двумя причинами:

– во-первых, в варианте №1 практически весь породный массив в окрестности штрека находится в предельном состоянии с повышенными деформационными свойствами, за счет которых возникающие на допредельной стадии концентрации нагрузок на раму сглаживаются и происходит более-менее равномерное «обжатие» рамы по ее контуру;

а)



б)

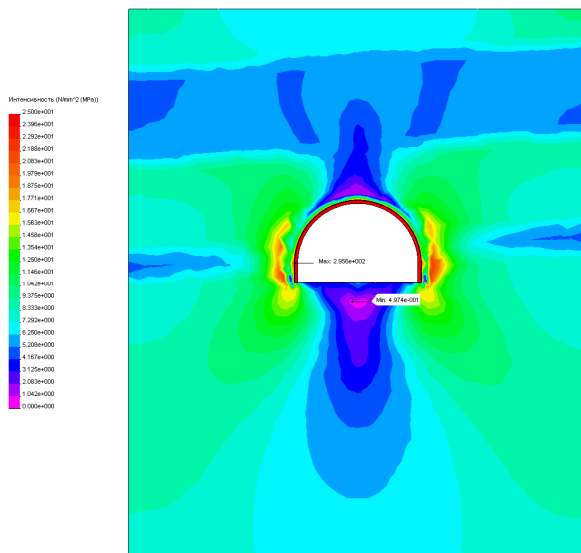


Рис. 8.7. Эпюры приведенных напряжений σ ($H = 400$ м)
в углевещающей толще для вариантов прочностных
характеристик слоев: а) №10; б) №7

– во-вторых, сам материал рамы (сталь Ст.5) во многих сечениях по своему контуру находится в напряженном состоянии, соответствующему площадке текучести; возникающие при этом пластические шарниры в данных сечениях благодаря своей податливости перераспределяют поле напряжений в раме в направлении сглаживания концентраций напряжений и загрузки недогруженных участков ее контура.

Для варианта №18 повышенных прочностных характеристик всех близлежащих породных слоев наблюдается (рис. 8.8, б) более высокая степень неоднородности эпюры распределения σ по контуру рамы от 180 МПа до 283 МПа. Максимум $\sigma = 296$ МПа располагается вверху прямолинейной части стойки рамы и указывает на ее пластический изгиб ($296 \text{ МПа} > \sigma_T$) в полость выработки под воздействием косонаправленных перемещений приконтурных пород в ее боках и практически горизонтальных перемещений под опорами стоек рамной крепи. Величина максимума σ в варианте №18 меньше такового для варианта №1 всего на 3%. Это обусловлено предельным состоянием рамной крепи в обоих вариантах независимо от прочностных характеристик близлежащих породных слоев (в интервале $\sigma_{сжс} = 5...20$ МПа), когда резко увеличенная деформационная способность стали на площадке текучести и начальном участке упрочнения не вызывает каких-либо существенных изменений напряжений.

Отличия эпюр σ в варианте №18 и №1 касаются в основном свода выработки, где относительно пониженная величина $\sigma = 210...250$ МПа в варианте №18 обусловлена, на наш взгляд, допредельным состоянием приконтурных пород кровли. В замке свода наблюдается интенсивный изгиб рамы, качественно подобный эпюре σ при допредельном деформировании системы «массив-крепь», что также объясняется приведенными выше причинами.

Изменение прочностных характеристик второго породного слоя кровли в четыре раза (варианты №7 и №10) практически не влияет на эпюры распределения σ в рамной крепи (рис. 8.9):

– все качественно-количественные характеристики эпюр σ имеют несущественные колебания;

– максимумы σ располагаются в одних и тех же областях, а их значения отличаются не более, чем на 0,1...0,2%.

Таким образом, из анализа НДС рамной крепи вытекают два основных вывода, обусловленные предельным (или близким к нему) состоянием ее материала в большинстве сечений контура:

– во-первых, прочностные характеристики второго породного слоя не оказывают сколь-нибудь заметного влияния на напряженное состояние рамной крепи;

– во-вторых, прочностные характеристики первых породных слоев кровли и почвы оказывают существенное влияние на эпюру распределения приведенных напряжений и координаты расположения их максимумов; сама величина максимума σ изменяется незначительно.

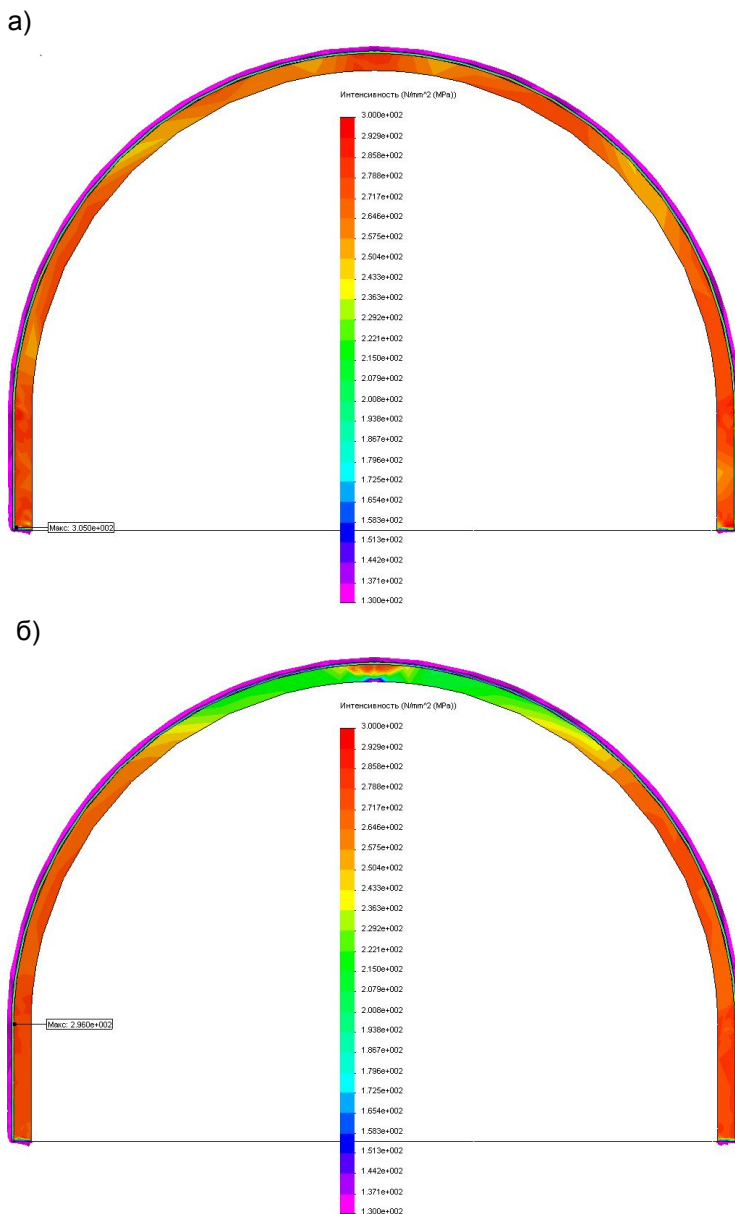


Рис. 8.8. Эпюры приведенных напряжений σ в рамной крепи ($H = 400$ м)
для вариантов прочностных характеристик породных слоев
углевмещающей толщи: а) №1; б) №18

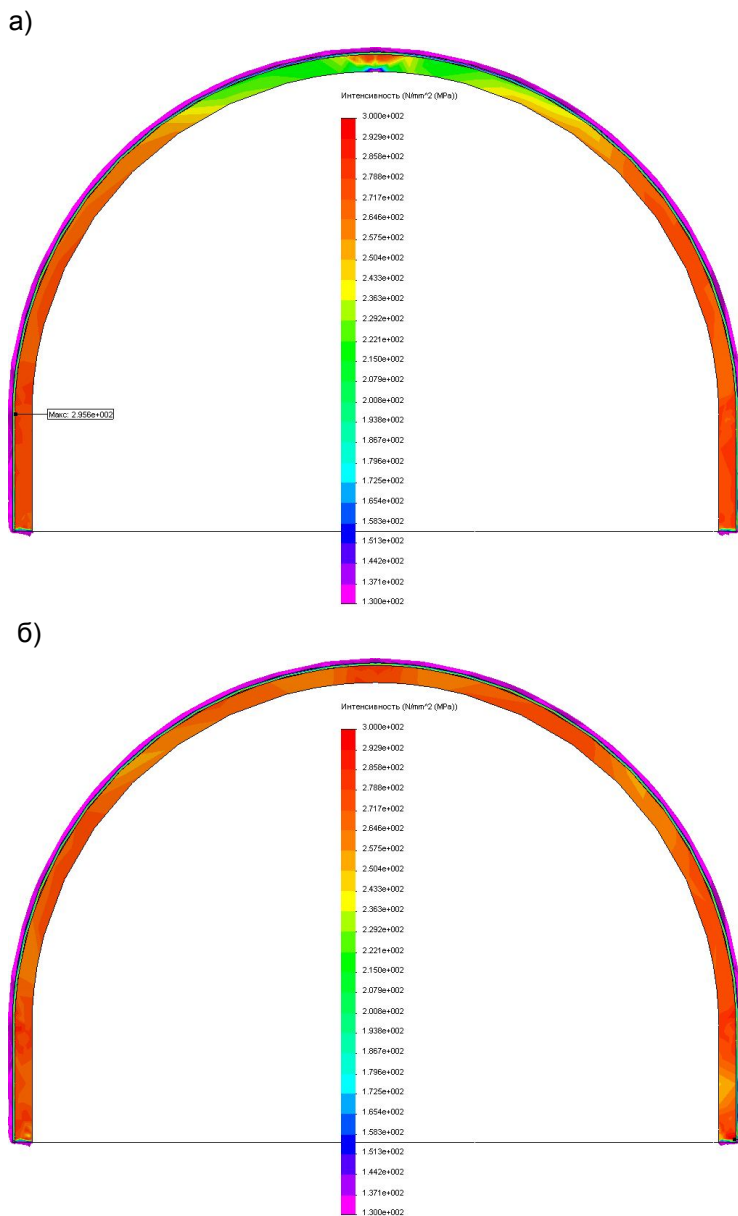


Рис. 8.9. Эпюры приведенных напряжений σ в рамной крепи ($H = 400$ м)
для вариантов прочностных характеристик породных слоев
углеватяющей толщи: а) №7; б) №10

9. ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ НДС СИСТЕМЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СООТНОШЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОИСТОГО УГЛЕВМЕЩАЮЩЕГО МАССИВА

На стадии допредельного деформирования системы «массив-крепь» установлена существенная связь ее НДС с величинами и соотношениями модулей деформации $E_i^{K,II}$ близлежащих породных слоев. Поэтому естественно предположить, что и на стадиях предельного и запредельного деформирования будет прослеживаться зависимость НДС системы с деформационными характеристиками углевмещающей толщи, что обусловлено следующими причинами:

- определенные области системы по-прежнему находятся в допредельном состоянии, где влияние $E_i^{K,II}$ доказано;

- на стадии разупрочнения породы (см. рис. 7.1) такая деформационная характеристика, как модуль спада $M_i^{K,II}$, непосредственно связана с модулем деформации породы на допредельной стадии;

- начало стадии разрыхления зависит (по параметру деформации ε_1 на рис. 7.1) от величин $E_i^{K,II}$ и $M_i^{K,II}$.

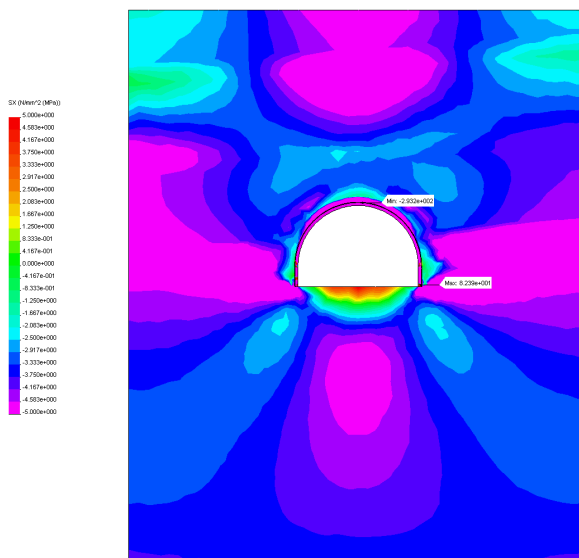
Таким образом, деформационные параметры полной диаграммы деформирования породы напрямую связаны с ее модулем деформации и для оценки их влияния на НДС системы использованы варианты соотношения деформационных характеристик породных слоев углевмещающей толщи, приведенные в табл. 5.1.

9.1. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕГО ПОРОДНОГО МАССИВА

Первоначально анализ напряженного состояния выполнен по горизонтальной компоненте σ_x , наиболее наглядно отражающей прогибы слоев углевмещающей толщи.

При пониженных прочностных характеристиках всех близлежащих породных слоев эпюры σ_x в качественно-количественном отношении схожи друг с другом (рис. 9.1 и рис. 8.8, а): в породных слоях действует достаточно

а)



б)

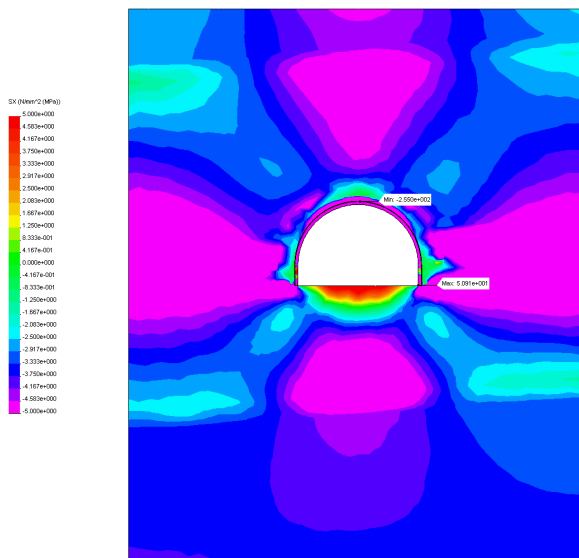


Рис. 9.1. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x при пониженных прочностных характеристиках всех близлежащих породных слоев (см. табл. 7.1) по вариантам их деформационных свойств (см. табл. 5.1): а) №10; б) №18

однородное поле сжимающих $\sigma_x = 6,5 \dots 10$ МПа. Исключение составляют приконтурные области: в боках и отчасти в кровле $\sigma_x = 0 \dots 5$ МПа на расстоянии $(0,2 \dots 0,5)r_{\theta}$, в почве $\sigma_x = 5 \dots 6,5$ МПа на глубину до $1,2r_{\theta}$. В пределах угольного пласта в его приконтурной части возникают локальные области с небольшими растягивающими напряжениями σ_x до 2,5 МПа, что, очевидно, связано с более интенсивным изгибом приконтурной области угольного пласта. В этом проявляется еще одна черта влияния пониженных деформационных характеристик породных слоев, когда область распространения растягивающих σ_x в угольном пласте становится более обширной, что объясняется уменьшенной реакцией сопротивления изгибу со стороны породных слоев при их пониженных деформационных свойствах.

При повышенных прочностных характеристиках всех близлежащих породных слоев эпюры σ_x еще более похожи между собой вне зависимости от их деформационных свойств (рис. 9.2 и рис. 8.8, б). Некоторые особенности состоят в следующем:

- при пониженных деформационных характеристиках породных слоев происходит более четкое разграничение в кровле штрека

- областей повышенного и пониженного σ_x (по отношению к исходной величине $\sigma_x = \frac{\gamma H}{3}$), что обусловлено более интенсивным изгибом слоев кров-

ли; здесь следует отметить, что в отличие от допредельного состояния, в кровле выработки действуют только сжимающие σ_x ;

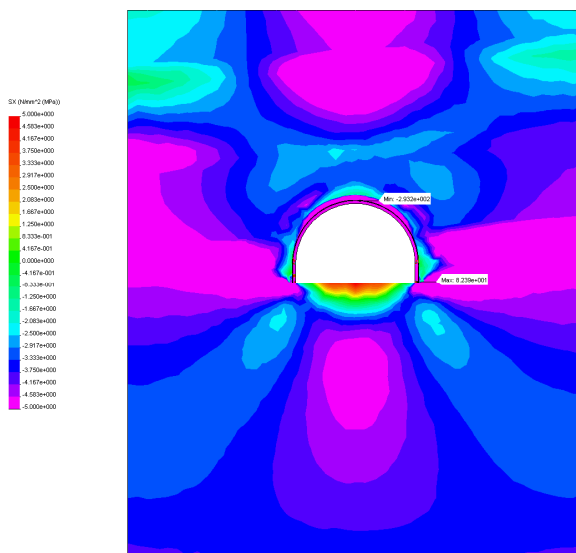
- при пониженных деформационных характеристиках породных слоев меньше области действия и величина растягивающих σ_x в непосредственной почве выработки, но выше сжимающие σ_x на границе первого и второго слоев почвы;

- первый породный слой почвы с повышенной деформативностью (за исключением ограниченной области, непосредственно примыкающей к выработке) более равномерно нагружен сжимающими σ_x без ярко выраженных проявлений изгибающего момента в этом слое.

В других наиболее «разнополюсных» вариантах (№10 и №7 по табл. 7.1) распределения прочностных характеристик близлежащих породных слоев (рис. 9.3 и рис. 9.4) тенденции влияния их деформационных свойств на эпюры σ_x аналогичны приведенным выше.

Анализ связи эпюр приведенных напряжений с деформационными характеристиками близлежащих породных слоев дал следующие результаты. При пониженных прочностных характеристиках всех близлежащих породных слоев (вариант №1 по табл. 7.1) эпюры σ практически не зависят от своих деформационных свойств (рис. 9.5 и рис. 8.6, а), что может быть объяснено их почти повсеместным предельным (запредельным) состоянием,

а)



б)

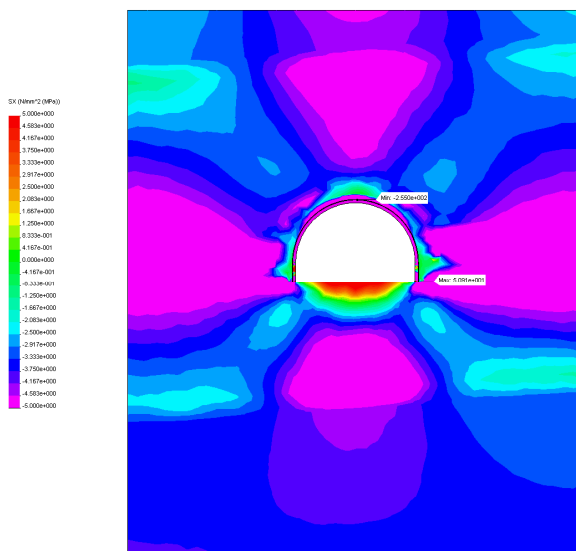
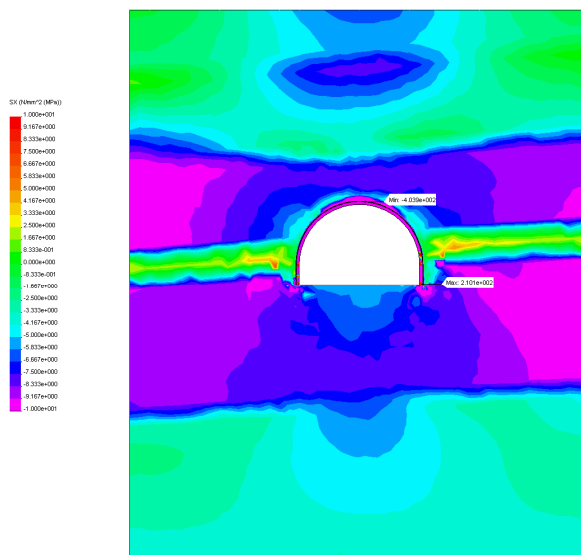


Рис. 9.2. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x при повышенных прочностных характеристиках всех близлежащих породных слоев (см. табл. 7.1) по вариантам их деформационных свойств (см. табл. 5.1): а) №10; б) №18

а)



б)

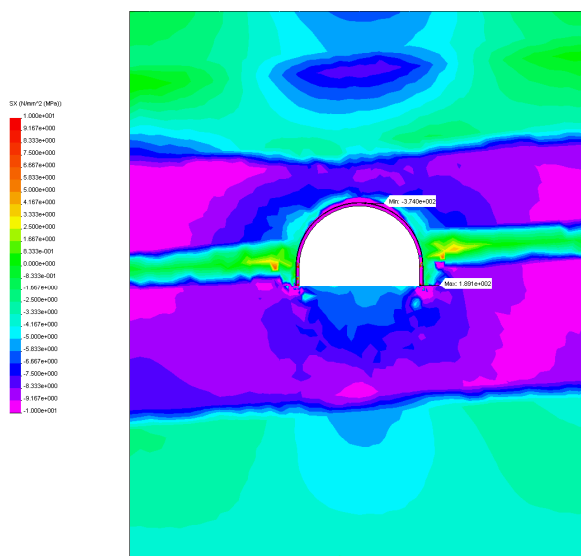
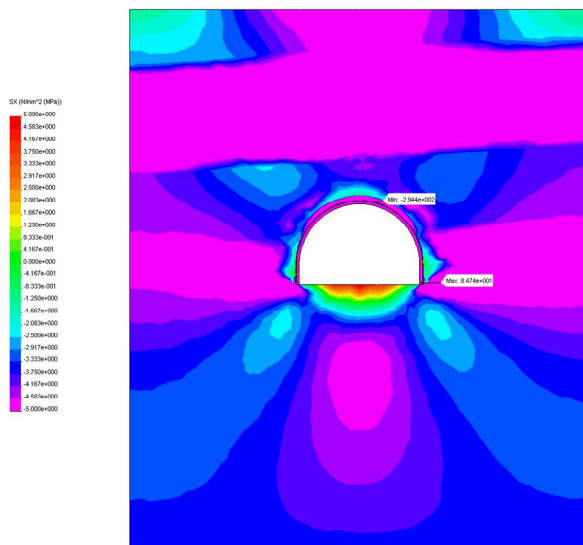


Рис. 9.3. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x для варианта №10 прочностных характеристик породных слоев (см. табл. 7.1) по вариантам их деформационных свойств (см. табл. 5.1): а) №10; б) №18

а)



б)

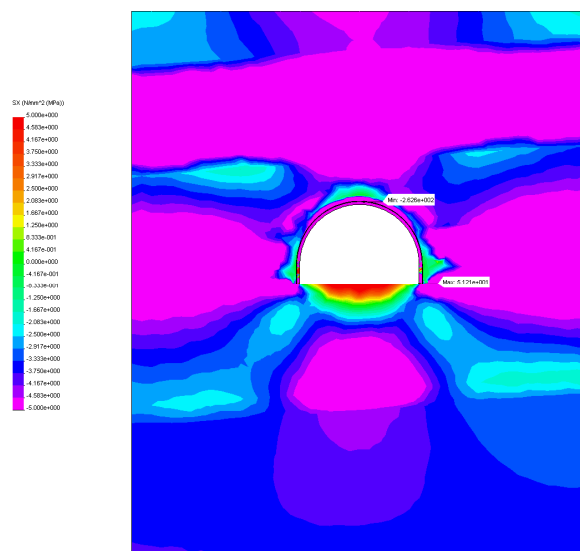
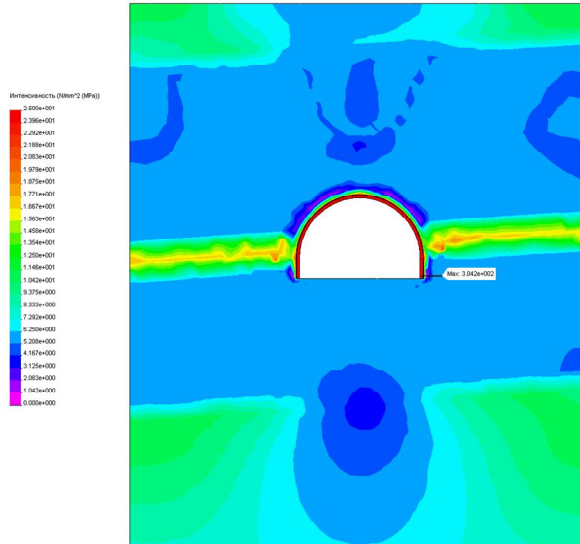


Рис. 9.4. Эпюры горизонтальных напряжений σ_x для варианта №7 прочностных характеристик породных слоев (см. табл. 7.1) по вариантам их деформационных свойств (см. табл. 5.1): а) №10; б) №18

а)



б)

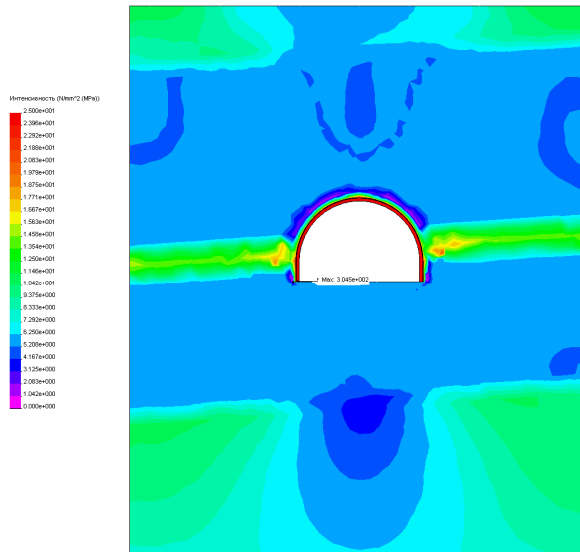


Рис. 9.5. Эпюры приведенных напряжений σ при пониженных прочностных характеристиках всех близлежащих породных слоев (см. табл. 7.1) по вариантам их деформационных свойств (см. табл. 5.1): а) №10; б) №18

обладающим повышенной деформационной способностью. Некоторое отличие эпюр σ состоит в более обширной зоне концентрации σ в угольном пласте при пониженных деформационных характеристиках породных слоев, что обусловлено, на наш взгляд, более высокими изгибающими напряжениями в угольном пласте, находящемся в допредельной стадии деформирования.

При повышенных прочностных характеристиках всех близлежащих породных слоев (вариант №18 по табл. 7.1) эпюры σ в основном аналогичны друг другу независимо от распределения их деформационных свойств (рис. 9.6 и рис. 8.6, б). Исключение составляют:

- более обширная зона разгрузки в почве при пониженных деформационных характеристиках слоев, что обусловлено их повышенным перемещением в полость выработки;

- несколько возросшая концентрация σ в боках выработки при повышенных деформационных характеристиках породных слоев, что объясняется в основном допредельным состоянием этих областей.

Изменение предела прочности на сжатие второго породного слоя кровли в четыре раза (рис. 9.7 и рис. 9.8) практически не сказывается на установленных выше тенденциях влияния деформационных характеристик близлежащих породных слоев.

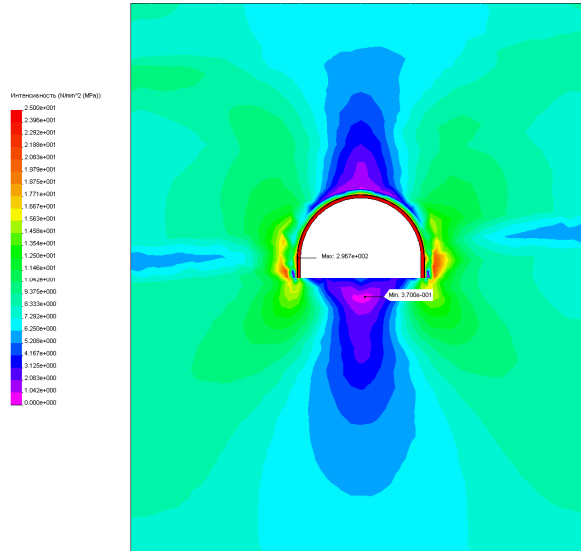
Основной вывод из проведенных исследований ($H = 400$ м) достаточно очевиден: в предельном (запредельном) состоянии породных слоев (или некоторых их областей) деформационные свойства последних в гораздо меньшей степени влияют на напряженное состояние углевмещающей толщи в сравнении с прочностными характеристиками (см. главу 8).

9.2. ПОЛЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ

Эпюры полных перемещений во вмещающем слоистом массиве имеют как сходные, так и отличительные черты по отношению к полям напряжений.

При пониженных прочностных характеристиках близлежащих породных слоев качественная картина перемещений массива достаточно стабильна (рис. 9.9 и рис. 8.2, а) вне зависимости от их деформационных свойств. Количественная оценка эпюр перемещений указывает на их существенную связь с деформационными характеристиками породных слоев. Перемещения в кровле штрека выше в 1,94...2,03 раза для варианта №1 (см. табл. 5.1) пониженного модуля деформации ($E_i^{K,II} = 0,3 \cdot 10^4$ МПа) всех близлежащих породных слоев по сравнению с вариантом №18 ($E_i^{K,II} = 01 \cdot 10^4$ МПа). Деформационные характеристики второго породного слоя кровли также оказывают определенное влияние на смещение кровли штрека. Так, увеличение

а)



б)

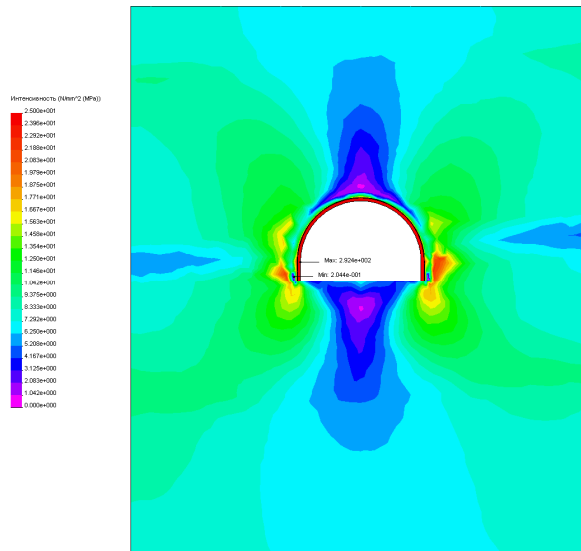
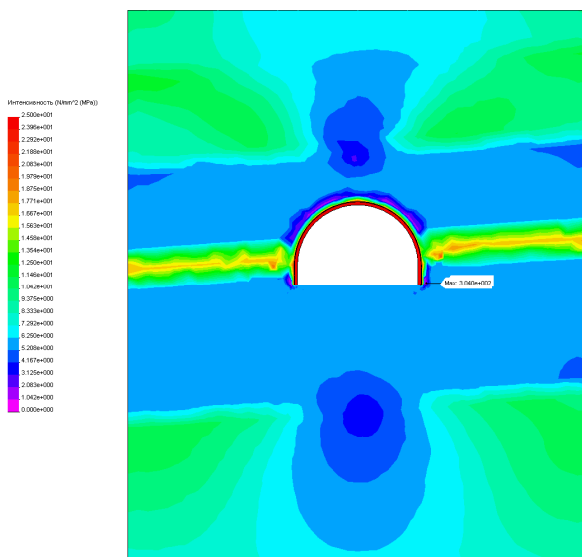


Рис. 9.6. Эпюры приведенных напряжений σ при повышенных прочностных характеристиках всех близлежащих породных слоев (см. табл. 7.1) по вариантам их деформационных свойств (см. табл. 5.1): а) №10; б) №18

а)



б)

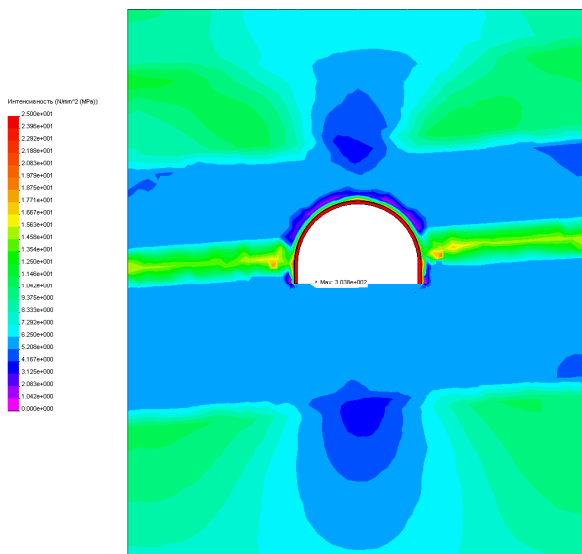
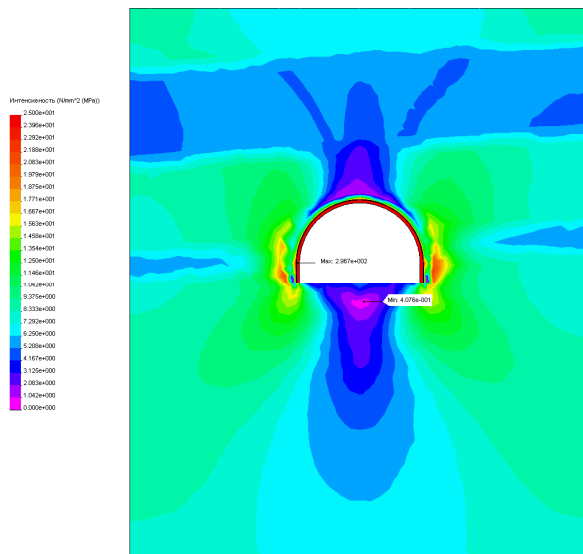


Рис. 9.7. Эпюры приведенных напряжений σ для варианта №10 прочностных характеристик породных слоев (см. табл. 7.1) по вариантам их деформационных свойств (см. табл. 5.1): а) №10; б) №18

а)



б)

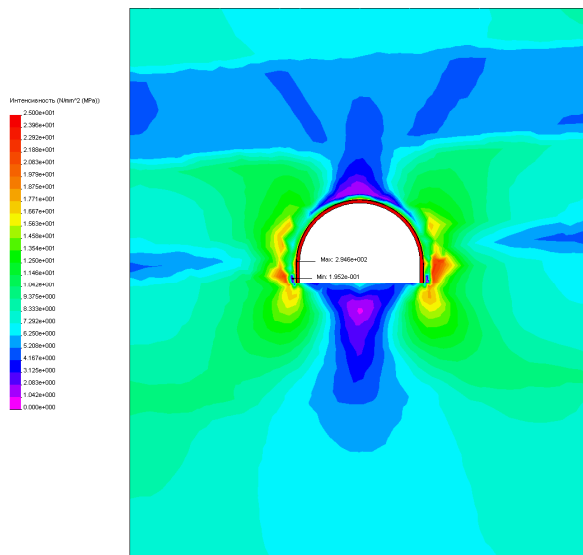
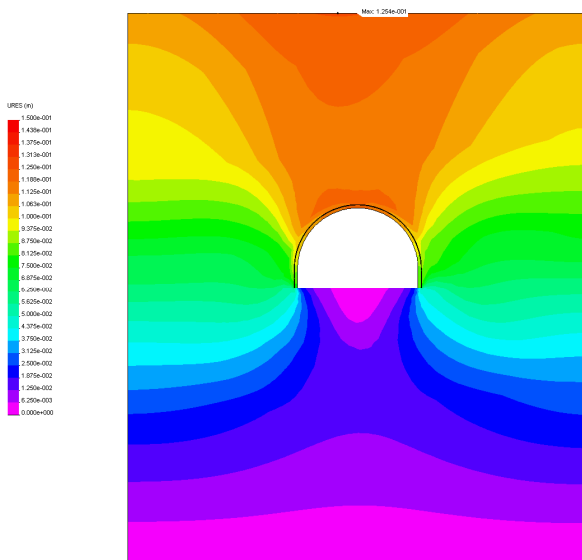


Рис. 9.8. Эпюры приведенных напряжений σ для варианта №7 прочностных характеристик породных слоев (см. табл. 7.1) по вариантам их деформационных свойств (см. табл. 5.1): а) №10; б) №18

а)



б)

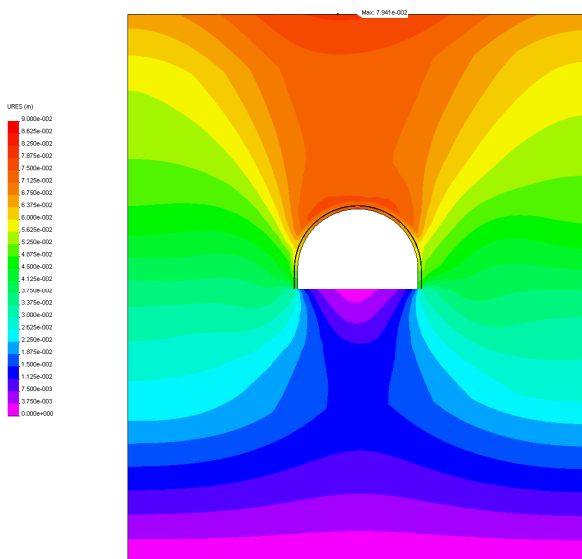
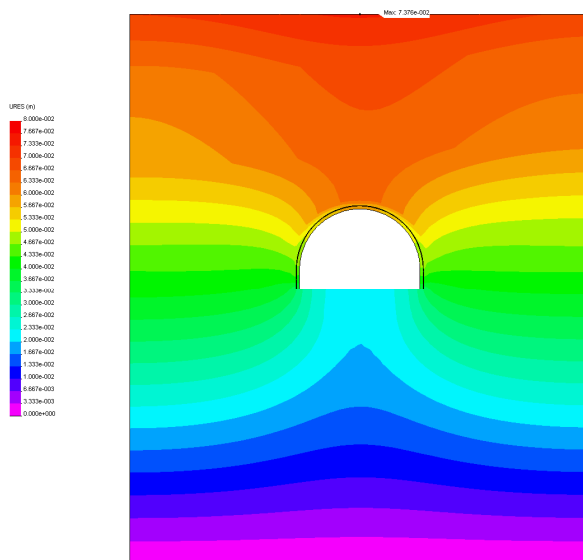


Рис. 9.9. Эпюры полных перемещений при пониженных прочностных характеристиках всех близлежащих породных слоев (см. табл. 7.1) по вариантам их деформационных свойств (см. табл. 5.1): а) №10; б) №18

а)



б)

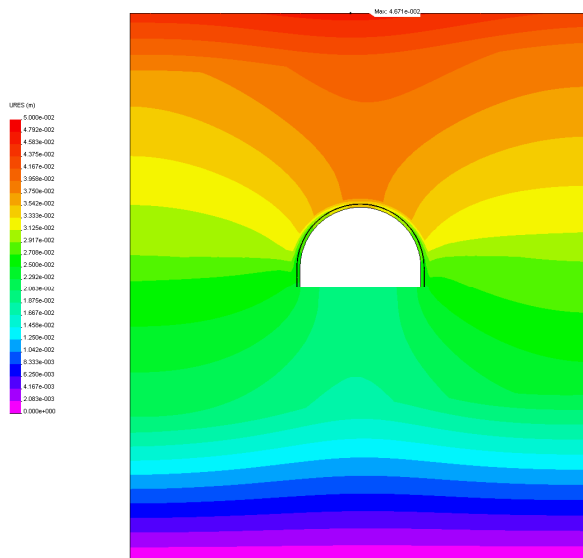


Рис. 9.10. Эпюры полных перемещений при повышенных прочностных характеристиках всех близлежащих породных слоев (см. табл. 7.1) по вариантам их деформационных свойств (см. табл. 5.1): а) №10; б) №18

(снижение) E_2^K в 3,33 раза приводит к снижению (увеличению) перемещений кровли на 22...29%. В боках выработки указанное влияние деформационных характеристик близлежащих породных слоев оценивается в 1,90...2,25 раза и 21...24% соответственно.

При повышенных прочностных характеристиках всех близлежащих породных слоев (рис. 9.10 и рис. 8.2, б) наблюдаются аналогичные закономерности. Так, смещения в кровле штрека в варианте №1 ($E_i^{K,II} = 0,3 \cdot 10^4$ МПа, см. рис. 8.2, б) оказались выше в 2,06...2,31 раза, чем в варианте №18 ($E_i^{K,II} = 1 \cdot 10^4$ МПа, см. рис. 9.10, б). Деформационные характеристики второго породного слоя кровли сказываются в гораздо меньшей степени (влияние всего 26...35% при изменении E_2^K в диапазоне $(0,3...1) \cdot 10^4$ МПа). В боках штрека смещения изменяются в 1,95...2,07 раза и на 23...25% соответственно. В почве штрека имеет место аналогичная картина.

Промежуточные разнополюсные (по прочностным характеристикам породных слоев) варианты №7 (рис. 9.11 и рис. 8.3, а) и №10 (рис. 9.12 и рис. 8.3, б) имеют, примерно, такие же диапазоны изменения перемещений контура выработки при интервале колебаний $E_i^{K,II} = (0,3...1) \cdot 10^4$ МПа.

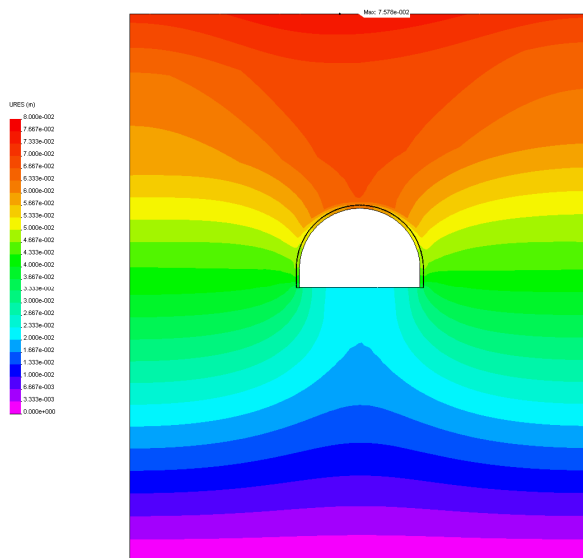
Таким образом, по результатам анализа эпюр перемещений в слоистой углевмещающей толще в окрестности пластовой выработки ($H = 400$ м) можно сделать вывод о существенном влиянии на поле перемещений деформационных характеристик не только первых породных слоев кровли и почвы, но и второго слоя кровли, что следует учитывать при разработке методики прогноза проявлений горного давления.

9.3. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАМНОЙ КРЕПИ

Рамная крепь пластового штрека находится в достаточно стабильном напряженном состоянии (по критерию оценки – величине приведенных напряжений) вне существенной зависимости от деформационных характеристик близлежащих породных слоев (рис. 9.13 и рис. 9.14, см. рис. 8.8 и рис. 8.9). Как отмечено ранее, очевидно, это связано с повышенной деформационной способностью вмещающих пород в предельном состоянии, обеспечивающего более равномерное нагружение рамы, а также с появлением пластических шарниров в раме, снижающих максимумы изгибающего момента по ее контуру (см. §8.3).

Изменение модуля деформации породных слоев в интервале $(0,3...1) \cdot 10^4$ МПа несущественно сказывается на максимуме σ как при пониженных (до 0,3%), так и повышенных (до 1,5%) прочностных характеристиках.

а)



б)

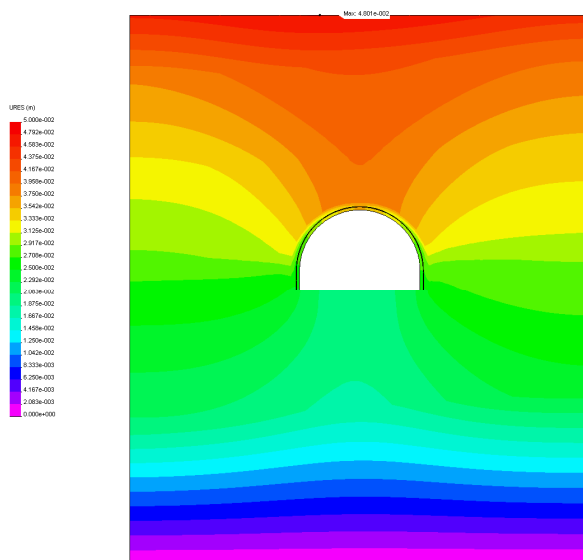
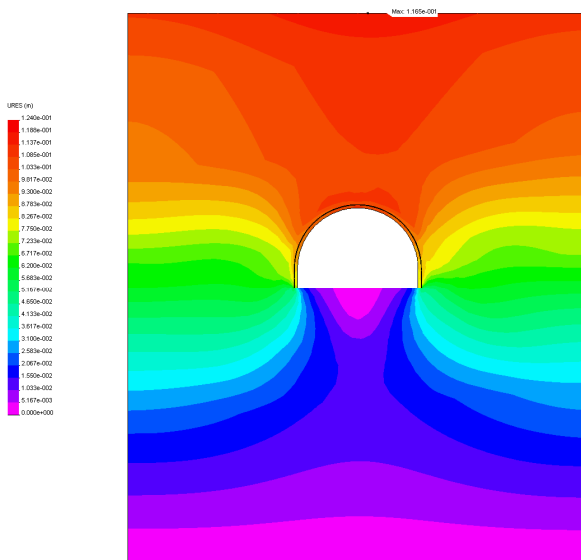


Рис. 9.11. Эпюры полных перемещений для варианта №7 прочностных характеристик породных слоев (см. табл. 7.1) по вариантам их деформационных свойств (см. табл. 5.1): а) №10; б) №18

а)



б)

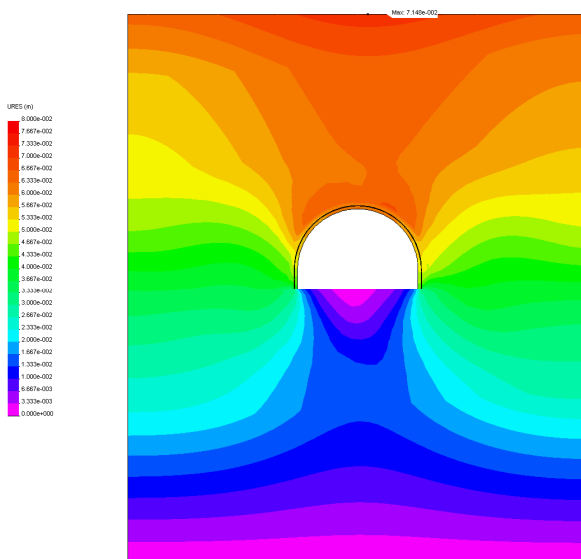
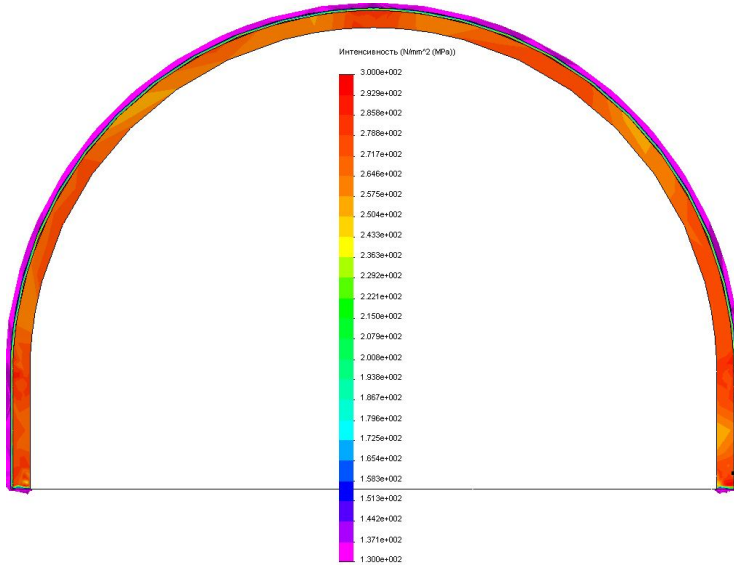


Рис. 9.12. Эпюры полных перемещений для варианта №10 прочностных характеристик породных слоев (см. табл. 7.1) по вариантам их деформационных свойств (см. табл. 5.1): а) №10; б) №18

а)



б)

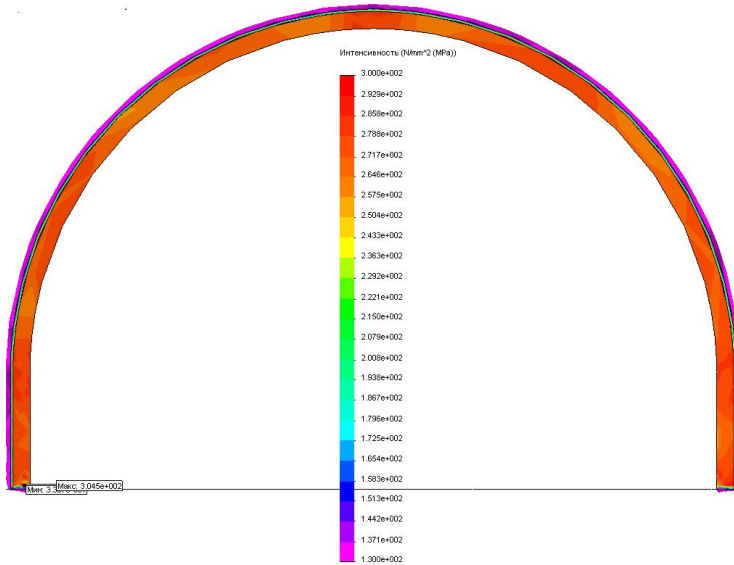
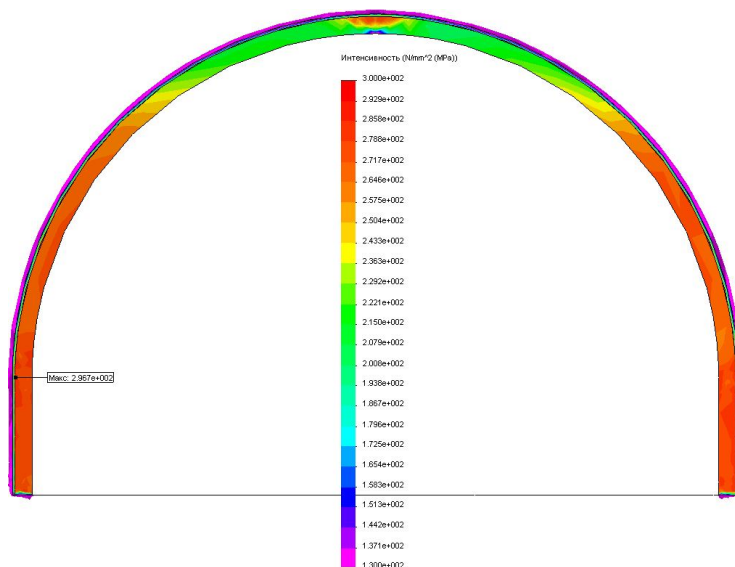


Рис. 9.13. Эпюры приведенных напряжений σ для варианта №1 прочностных характеристик породных слоев (см. табл. 7.1) по вариантам их деформационных свойств (см. табл. 5.1): а) №10; б) №18

а)



б)

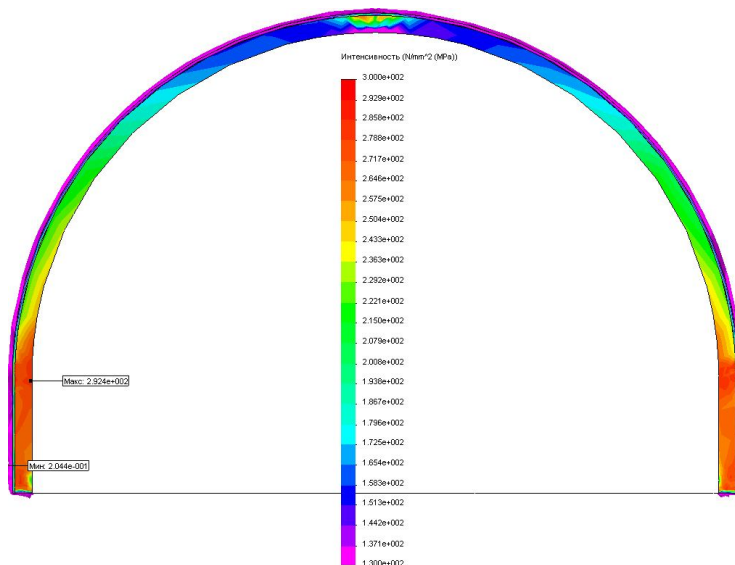


Рис. 9.14. Эпюры приведенных напряжений σ для варианта №18 прочностных характеристик породных слоев (см. табл. 7.1) по вариантам их деформационных свойств (см. табл. 5.1): а) №10; б) №18

Качественно-количественный анализ эпюр распределения σ в зависимости от $E_i^{K,II}$ выявил следующие особенности:

– при пониженных прочностных характеристиках всех близлежащих породных слоев уменьшение $E_i^{K,II}$ способствует более равномерному распределению σ по контуру рамы: имеющиеся области пониженного $\sigma = (0,90...0,93)\sigma_T$ уменьшаются с приближением $\sigma = (0,93...0,98)\sigma_T$ к пределу текучести стали Ст.5; большая часть объема рамной крепи находится в пластическом или близком к нему состояниях;

– при повышенных прочностных характеристиках породных слоев увеличение $E_i^{K,II}$ способствует некоторой разгрузке свода рамы до $(0,56...0,81)\sigma_T$, особенно в районе замка свода; это объясняется увеличением жесткости породных слоев, что повышает сопротивление их прогибу и частично разгружает свод рамы;

– минимум приведенных напряжений находится в закрепном пространстве в нижней части прямолинейного участка стойки рамы, а сама величина $\sigma = 0,2...0,5$ МПа в забутовке закрепного пространства указывает, что она находится еще в стадии уплотнения с повышенной деформационной способностью, благодаря чему до некоторой степени сглаживается эпюра нагрузки на раму.

Общий вывод по результатам оценки влияния деформационных характеристик близлежащих породных слоев на НДС системы «массив-крепь» в предельном (запредельном) состоянии ($H = 400$ м) следующий:

– во-первых, напряженное состояние вмещающего штрек породного массива и, особенно, рамной крепи не имеет столь тесной связи с деформационными характеристиками породных слоев как с их прочностными свойствами;

– во-вторых, эпюра перемещений системы, в том числе и породного контура выработки, находится в тесной связи с деформационными характеристиками всех близлежащих породных слоев.

10. ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ НА НДС СИСТЕМЫ «МАССИВ-КРЕПЬ»

Общеизвестно, что с ростом глубины разработки увеличивается исходное поле напряжений слоистой углевмещающей толщи, которое из начального негидростатического состояния переходит в отдельных слоях (пределное деформирование) в близкое к гидростатическому и на стадии за-пределного деформирования наблюдается увеличение горной породы в объеме [135-137, 140] за счет разрыхления. Эти закономерности исследованы на примере слабого слоистого массива, вмещающего пластовую выработку, отражающего условия эксплуатации пластовых выработок шахт Западного Донбасса.

10.1. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ БЛИЗЛЕЖАЩЕГО СЛОИСТОГО МАССИВА

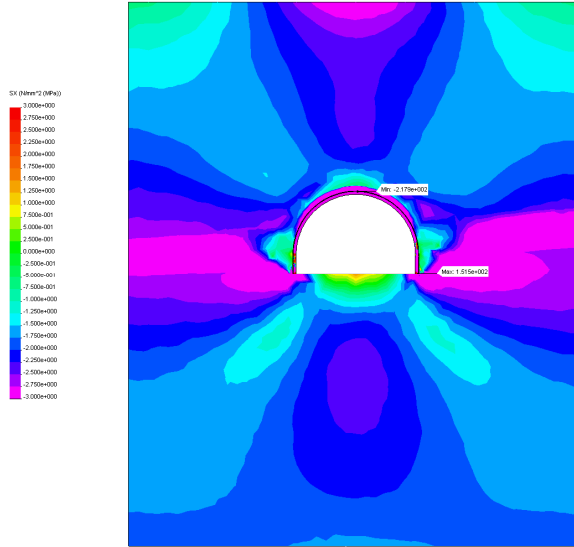
По аналогии с предыдущими исследованиями напряженного состояния углевмещающего породного массива проанализировано изменение компонент σ_x и σ с ростом глубины расположения выработки.

Исследовано поле горизонтальных напряжений при пониженных прочностных ($\sigma_{сж_i}^{K,II} = 5$ МПа) и деформационных ($E_i^{K,II} = 0,3 \cdot 10^4$ МПа) характеристиках всех близлежащих породных слоев (рис. 10.1 и рис. 8.4, а). При $H = 200$ м большая часть углевмещающей толщи (за исключением локальных областей вокруг выработки) находится в допределном состоянии с соответствующими особенностями распределения σ_x (см. рис. 10.1, а):

- повышенная разгрузка в приконтурных породах почвы выработки (с появлением растягивающих σ_x) по сравнению с ее кровлей;
- повышенные сжимающие напряжения на более отдаленных участках кровли и почвы, что свидетельствует о прогибе слоев в полость выработки;
- повышенные сжимающие напряжения в районе угольного пласта за счет увеличенного коэффициента бокового распора ($\mu^y > \mu_i^{K,II}$);
- на остальных участках σ_x приближается к исходному негидростатическому состоянию.

С увеличением глубины разработки до $H = 400$ м эпюра σ_x коренным образом изменяется (см. рис. 8.4, а), что связано с переходом подавляющей части близлежащих породных слоев в предельное состояние (подробное

а)



б)

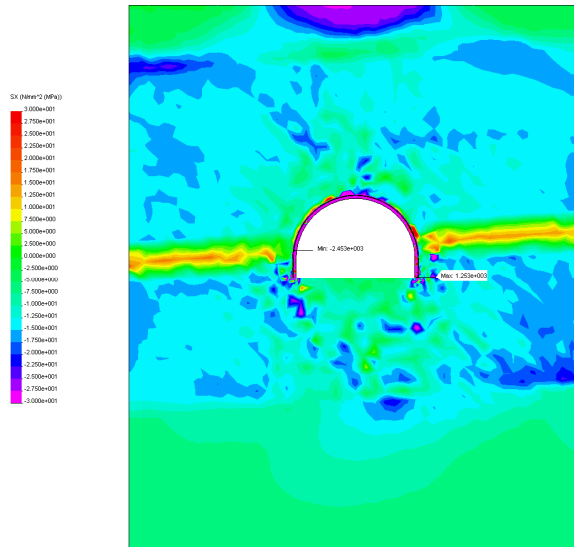


Рис. 10.1. Эпюры распределения горизонтальных напряжений σ_x при пониженных прочностных и деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев:
а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

описание приведено в §8.2 и §9.1). При $H = 600$ м происходят дальнейшие изменения эпюры σ_x (см. рис. 10.1, б), обусловленные не столько предельным (разупрочнение), сколько запредельным (разрыхление) состоянием породных слоев:

– разгружаются от σ_x более отдаленные породные слои (второй в почве и третий в кровле), которые начинают в определенной мере участвовать в процессах движения углевмещающей толщи в полость выработки;

– в приконтурных породах по всему периметру выработки, где действуют пониженные σ_x , появляются отдельные области с $\sigma_x > \gamma H$, что указывает на активный процесс разрыхления породы;

– в более отдаленных участках близлежащих породных слоев величина $\sigma_x > \gamma H$, что характеризует их практически повсеместный переход не только в предельное, но и запредельное состояние, резко интенсифицирующее сдвигание углевмещающего массива в полость выработки;

– в более прочном (по сравнению с породой) угольном пласте на всю близлежащую область по восстанию и падению распространяются растягивающие σ_x по мощности пласта с максимумом в его срединной части, достигающем 12...18 МПа; этот факт объясняется существенным градиентом перемещений породных слоев в полость выработки в предельном (запредельном) состоянии и указывает на то, что в угольном пласте также нарушается его целостность, но уже от растягивающих напряжений.

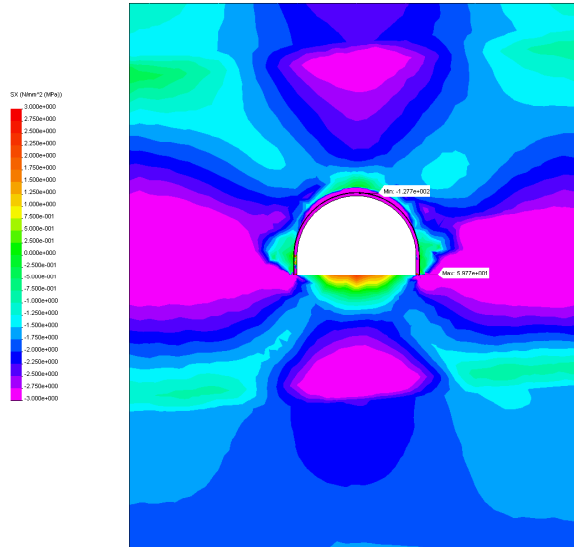
Таким образом, при пониженных прочностных характеристиках близлежащих породных слоев с ростом глубины расположения пластовой выработки наблюдается резкое изменение поля горизонтальных напряжений не только в количественном, но и в качественном плане.

Проследим, как влияют повышенные деформационные характеристики близлежащих породных слоев ($E_i^{K,II} = 1 \cdot 10^4$ МПа) при тех же пониженных их прочностных свойствах ($\sigma_{сж_i}^{K,II} = 5$ МПа) на тенденции изменения поля σ_x с ростом глубины разработки (рис. 10.2 и рис. 9.1, б).

Сравнивая данные эпюры σ_x с предыдущим вариантом ($E_i^{K,II} = 0,3 \cdot 10^4$ МПа) можно отметить, что с ростом H они становятся все более похожими друг на друга как в качественном, так и количественном отношении. Очевидно, это объясняется тем, что в предельном и, особенно, в запредельном состояниях деформационные свойства породных слоев многократно превышают таковые в допредельном состоянии и влияние $E_i^{K,II}$ становится несущественным.

Только на малой глубине ($H = 200$ м) имеются некоторые отличия (см. рис. 10.2, а и рис. 10.1, а) в части более обширных зон разгрузки в приконтурной области и повышенных σ_x на отдаленных участках массива, что обусловлено повышенной жесткостью породных слоев.

а)



б)

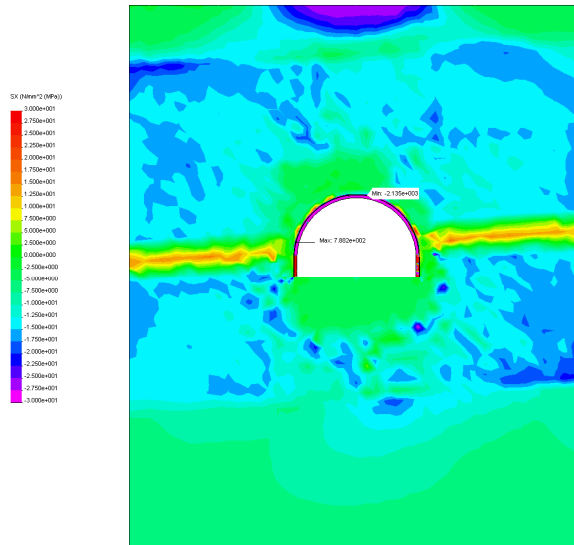


Рис. 10.2. Эпюры распределения горизонтальных напряжений σ_x
при пониженных прочностных и повышенных деформационных
характеристиках всех близлежащих породных слоев:
а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

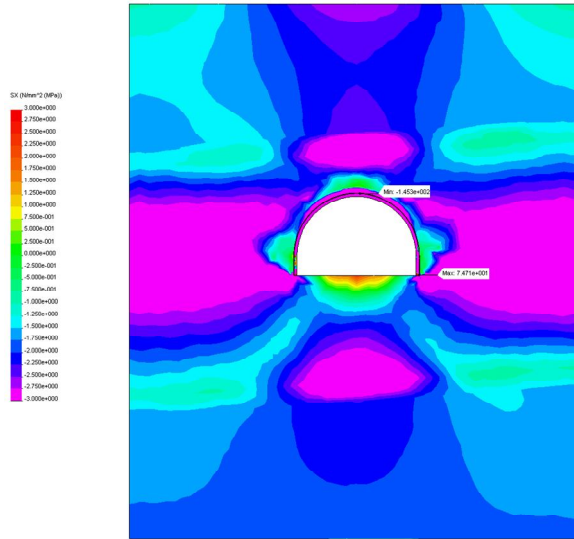
Промежуточные варианты №7 (рис. 10.3) и №10 (рис. 10.4) распределения деформационных характеристик близлежащих породных слоев (см. табл. 5.1) окончательно подтверждают отмеченные выше закономерности изменения поля σ_x с ростом глубины разработки.

Повышенные прочностные характеристики ($\sigma_{сж_i}^{K,II} = 20$ МПа) всех близлежащих породных слоев существенным коренным образом преобразуют тенденцию изменения поля компоненты σ_x при увеличении глубины расположения выработки. Это обусловлено тем, что основной объем углевмещающей толщи находится еще в допредельном состоянии за исключением локальных областей в основном в приконтурных породах. Как при пониженных (рис. 10.5 и рис. 8.4, б), так и при повышенных (рис. 10.6 и рис. 9.2, б) деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев наблюдается довольно стабильная качественная картина поля напряжений σ_x , мало связанная с величиной H . В количественном отношении компонента σ_x монотонно возрастает с увеличением H по зависимости, близкой к линейной. Это обусловлено линейными соотношениями между напряжениями и деформациями в допредельном состоянии элементарного породного объема. Чередование пониженных и повышенных деформационных характеристик в близлежащих породных слоях (рис. 10.7 и рис. 10.8) не вносят сколь-нибудь значимых изменений в тенденции связи поля σ_x и глубины расположения выработки.

Наиболее информативный параметр – эпюра приведенных напряжений σ имеет схожие с компонентой σ_x тенденции связи с глубиной расположения выработки.

При пониженных прочностных и деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев (рис. 10.9 и рис. 8.6, а) наблюдается их переход из частичного допредельного состояния ($H = 200$ м) в предельное ($H = 400$ м), а при $H = 600$ м в предельном (запредельном) состоянии находится и большая часть второго слоя почвы, третьего слоя кровли и сам угольный пласт. При $H = 400$ м в кровле и почве на некотором расстоянии от выработки образуются эллипсоидальные области, где имеет место допредельное состояние породы, хотя величина σ уже приближается к разрушающему. При $H = 600$ м эти области практически исчезают в первом слое почвы и втором слое кровли и переходят в более отдаленные породные слои. Относительно разгруженная приконтурная зона в кровле и боках выработки на глубину $(0,2...0,4)r_g$ находится в состоянии, близком к предельному ($H \geq 400$ м), что провоцирует развитие значительных нагрузок на рамную крепь. На глубине 600 м угольный пласт уже перестает быть сдерживающим фактором при развитии сдвижений вмещающего массива, поскольку большая его часть находится в предельном состоянии.

а)



б)

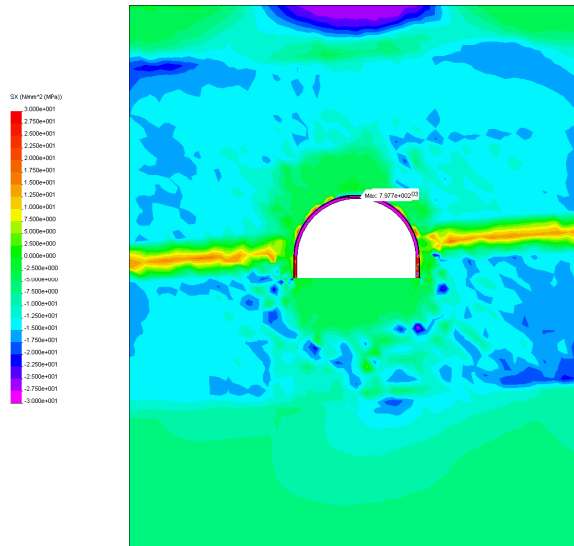
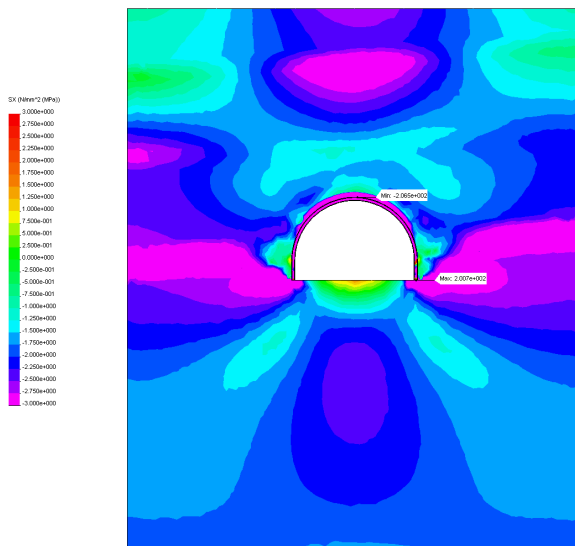


Рис. 10.3. Эпюры распределения горизонтальных напряжений σ_x при пониженных прочностных характеристиках всех близлежащих породных слоев по варианту №7 (см. табл. 5.1) их деформационных свойств: а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

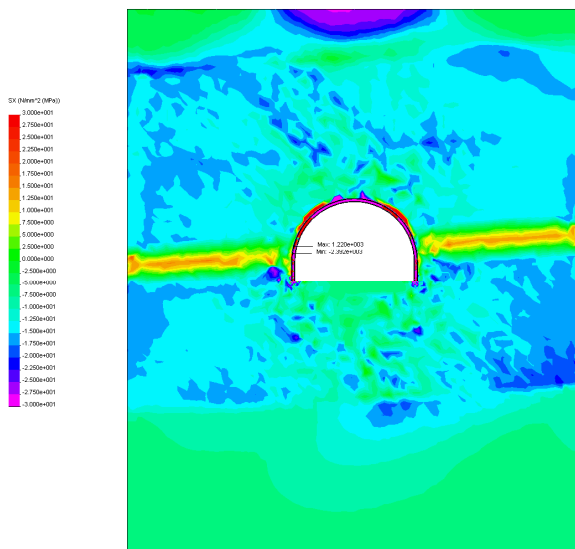
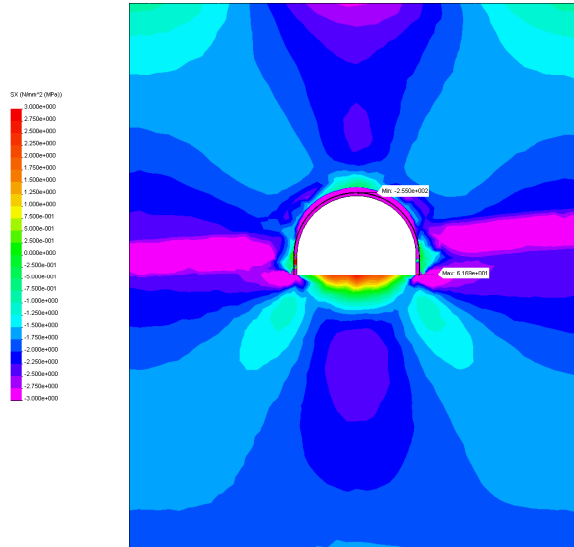


Рис. 10.4. Эпюры распределения горизонтальных напряжений σ_x при пониженных прочностных характеристиках всех близлежащих породных слоев по варианту №10 (см. табл. 5.1) их деформационных свойств: а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

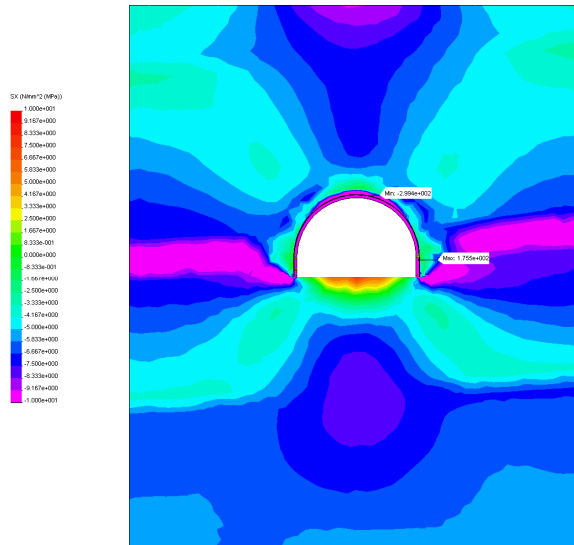
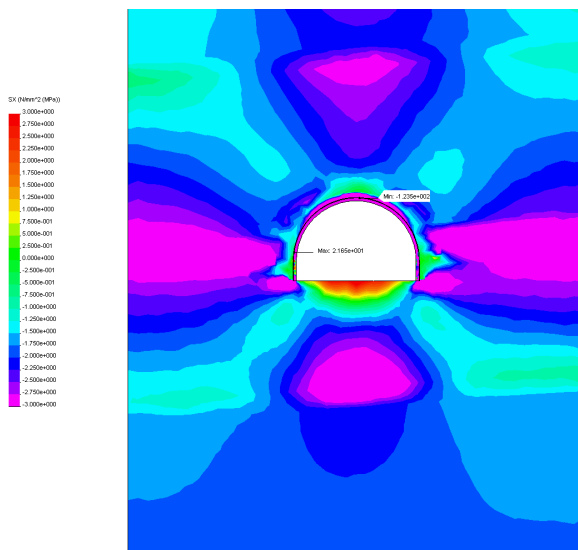


Рис. 10.5. Эпюры распределения горизонтальных напряжений σ_x при повышенных прочностных и пониженных деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев:
а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

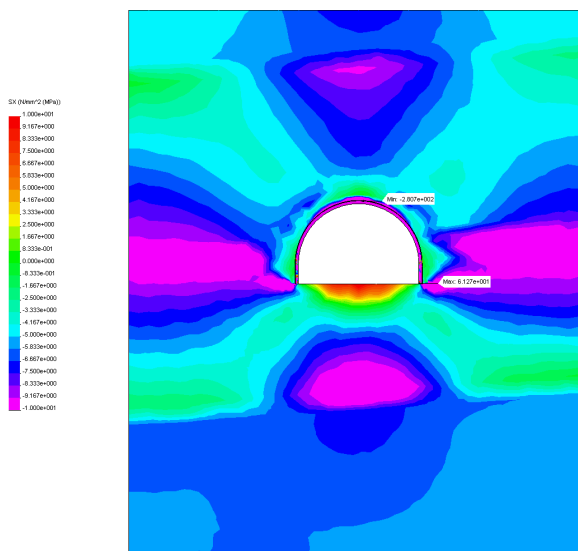
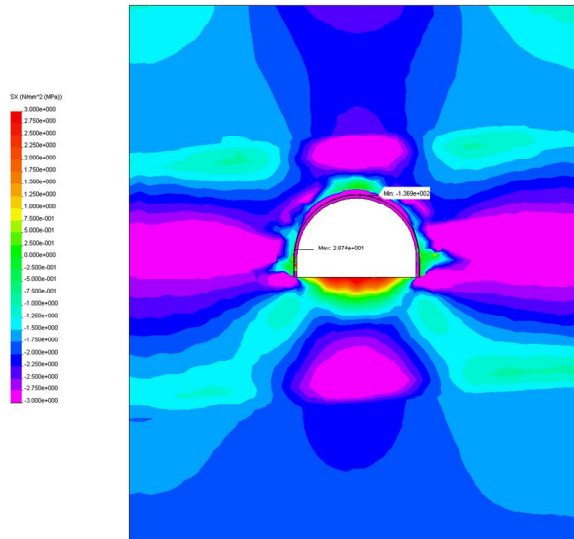


Рис. 10.6. Эпюры распределения горизонтальных напряжений σ_x при повышенных прочностных и деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев: а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

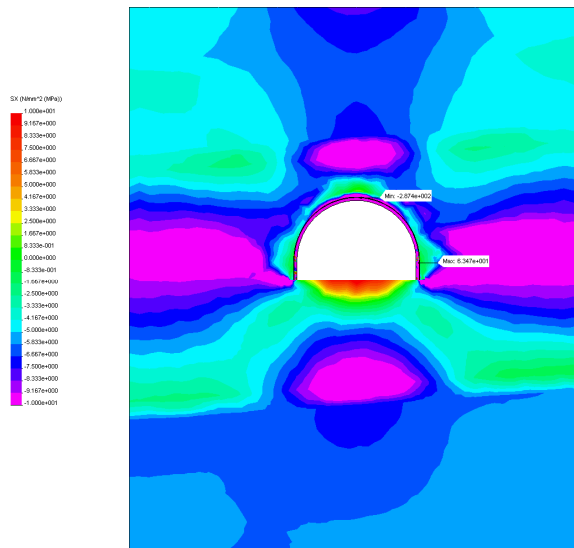
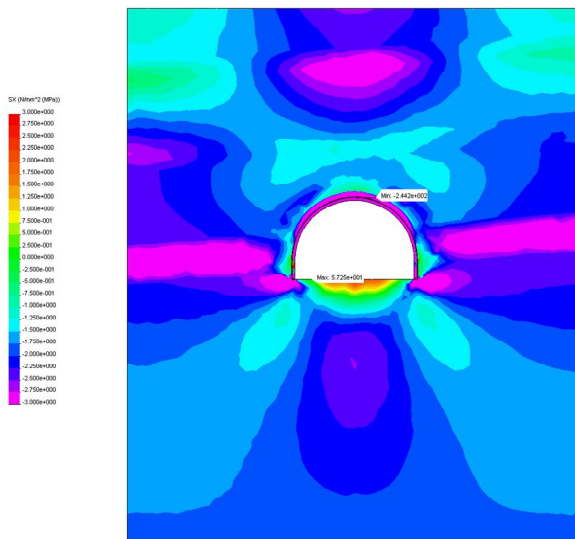


Рис. 10.7. Эпюры распределения горизонтальных напряжений σ_x при повышенных прочностных характеристиках всех близлежащих породных слоев (см. табл. 7.1) по варианту №7 (см. табл. 5.1) их деформационных свойств: а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

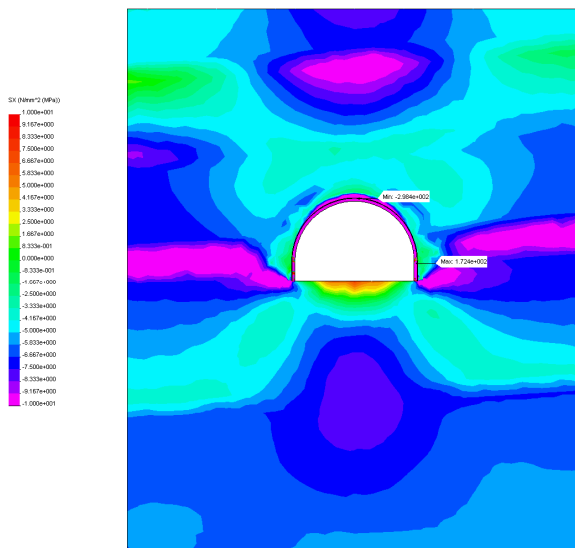
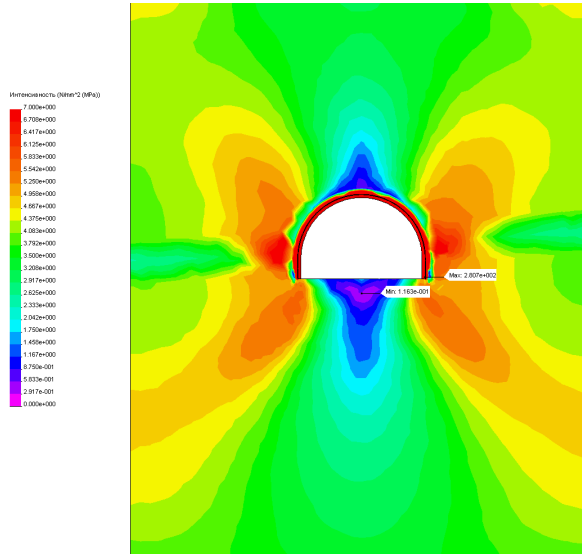


Рис. 10.8. Эпюры распределения горизонтальных напряжений σ_x при повышенных прочностных характеристиках всех близлежащих породных слоев (см. табл. 7.1) по варианту №10 (см. табл. 5.1) их деформационных свойств: а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

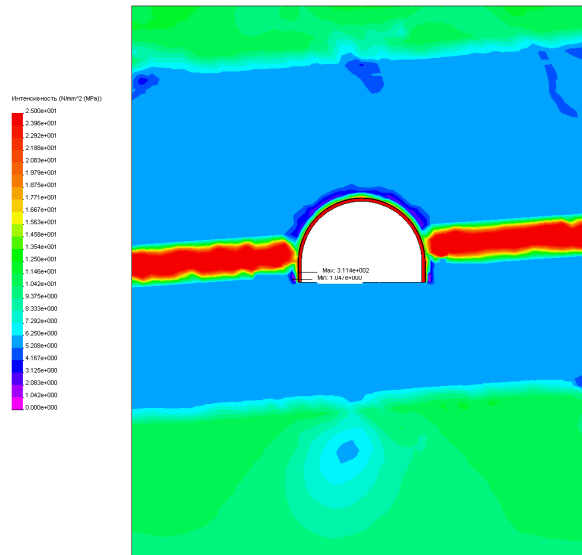


Рис. 10.9. Эпюры распределения приведенных напряжений σ_x
при пониженных прочностных и деформационных характеристиках
всех близлежащих породных слоев: а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

Повышенные деформационные характеристики близлежащих породных слоев (рис. 10.10 и рис. 9.5, б) практически не изменяют качественной и количественной картины связи параметров σ и H .

Повышенные прочностные характеристики близлежащих породных слоев обеспечивают допредельное состояние большей их части (рис. 10.11 и рис. 8.6, б). В этих областях приведенные напряжения возрастают прямо пропорционально глубине разработки. Однако при $H = 600$ м некоторая часть второго слоя почвы и третьего слоя кровли переходят в предельное состояние, так как их прочностные характеристики ниже, чем у близлежащих породных слоев. Но, поскольку в пределах ширины выработки имеется относительно разгруженная область, находящаяся в допредельном состоянии, она позволяет сохранить связь σ и H , близкую к линейной, для подавляющей части углевмещающей толщи. Здесь также наблюдается незначительное влияние повышенных деформационных характеристик близлежащих породных слоев в части некоторого увеличения размеров области концентрации σ в боках и почве (под опорами стоек рамы) с одновременным небольшим снижением их максимума (рис. 10.12 и рис. 9.6, б).

В рамках исследуемого диапазона $E_i^{K,II} = (0,3...1) \cdot 10^4$ МПа различные сочетания деформационных характеристик отдельных близлежащих породных слоев дают результаты, аналогичные вышеприведенным.

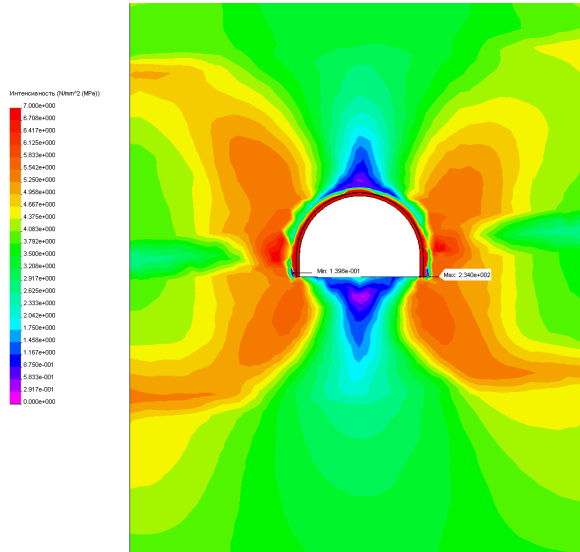
Подытоживая результаты выполненного анализа эпюр распределения компонент напряжений по мере увеличения глубины расположения выработки можно сказать, что определяющими параметрами состояния массива являются прочностные характеристики. В этой связи показательным являются эпюры σ вариантов №7 (рис. 10.13 и рис. 8.7, б) и №10 (рис. 10.14 и рис. 8.7, а) распределения прочностных характеристик близлежащих породных слоев (см. табл. 7.1):

- породные слои пониженной прочности с ростом H переходят в предельное (запредельное) состояние практически независимо от прочностных характеристик соседних более крепких породных слоев;

- эпюра σ в породных слоях с более высокими прочностными характеристиками в малой степени зависит от перехода соседнего слоя в предельное состояние;

- распределение σ в угольном пласте, втором слое почвы и третьем слое кровли достаточно стабильно по отношению к виду состояния какого-либо близлежащего породного слоя.

а)



б)

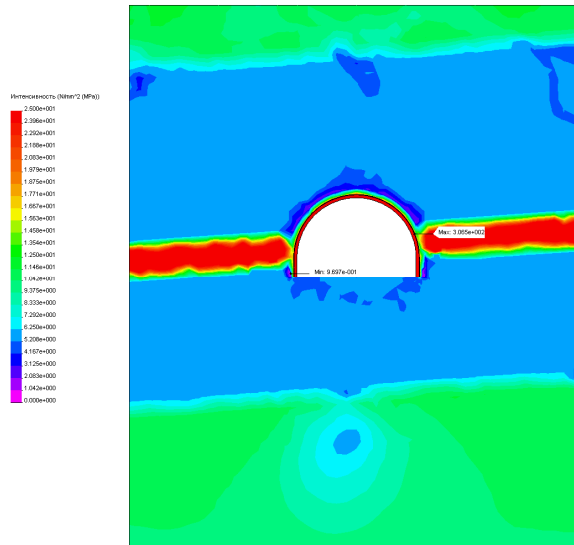
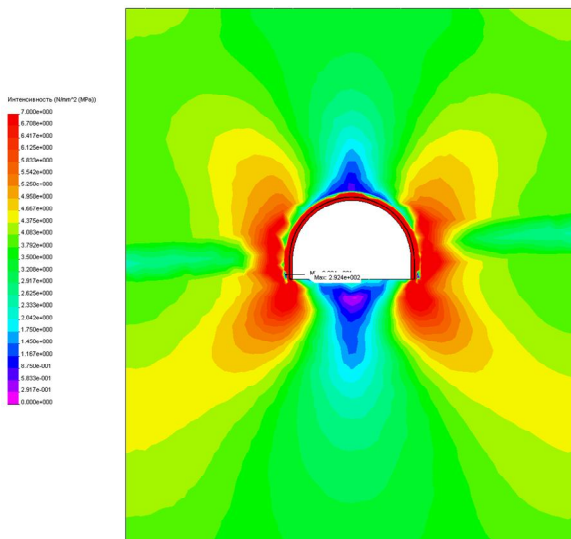


Рис. 10.10. Эпюры распределения приведенных напряжений σ_x при пониженных прочностных и повышенных деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев:
а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

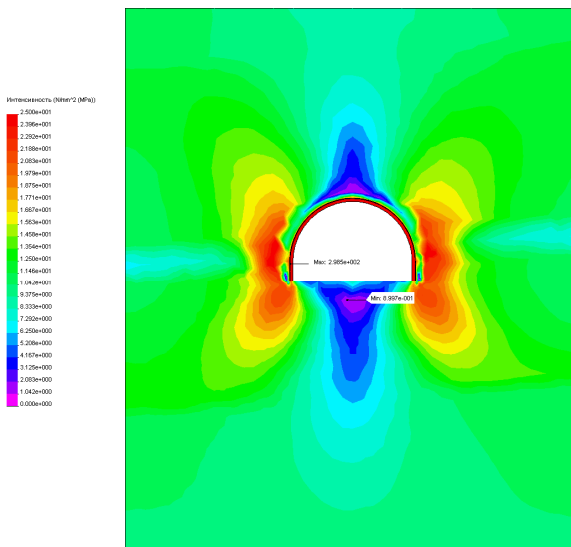
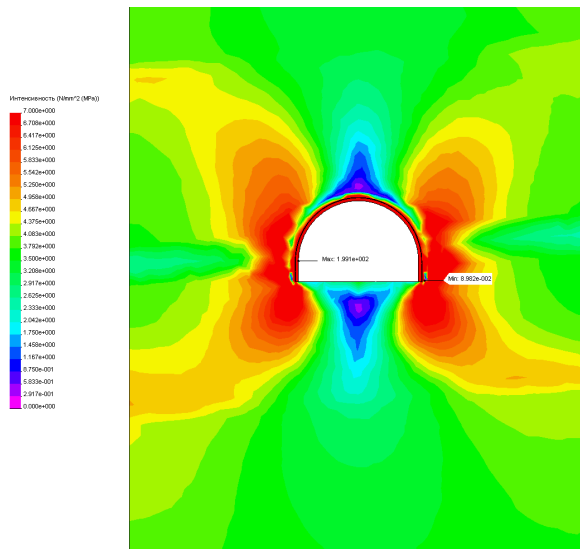


Рис. 10.11. Эпюры распределения приведенных напряжений σ_x
при повышенных прочностных и пониженных деформационных
характеристиках всех близлежащих породных слоев:
а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

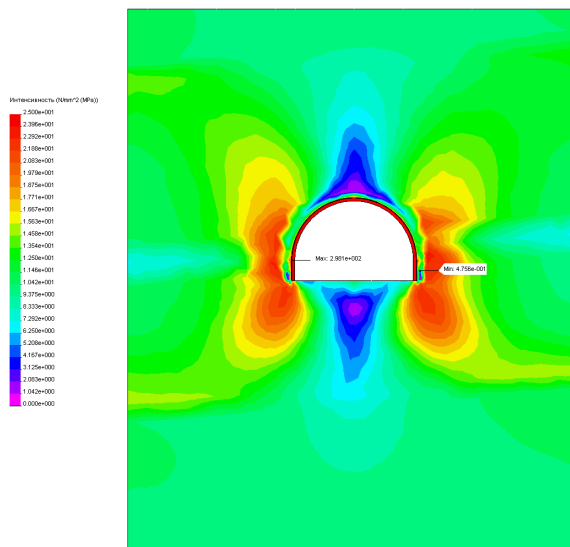
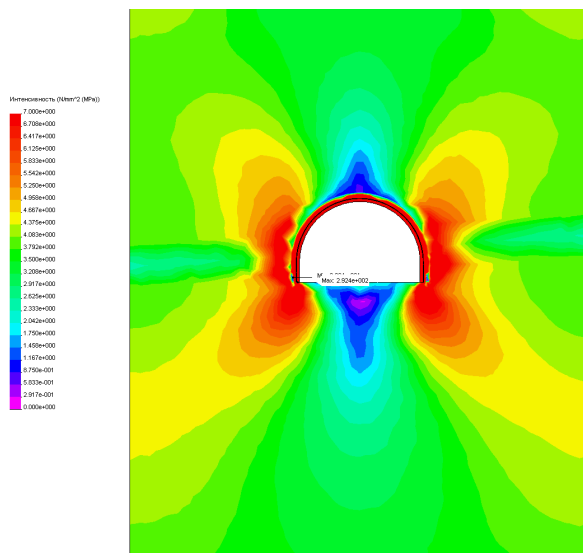


Рис. 10.12. Эпюры распределения приведенных напряжений σ_x при повышенных прочностных и деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев:
а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

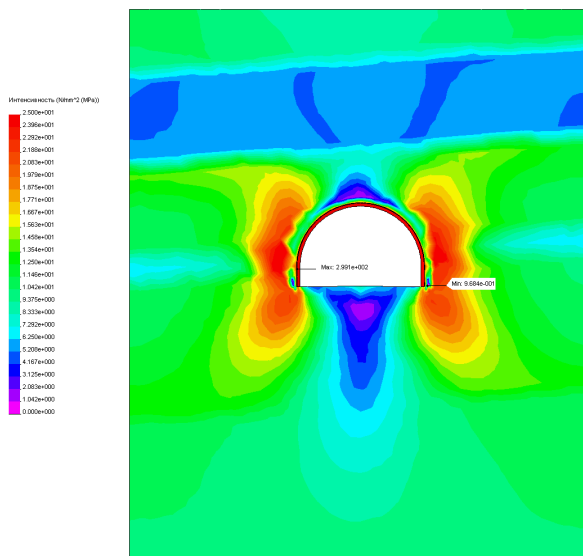
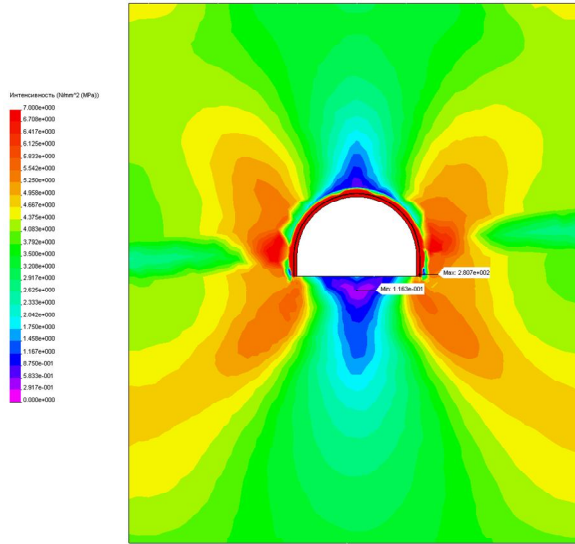


Рис. 10.13. Эпюры распределения приведенных напряжений σ при пониженных деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев по варианту №7 (см. табл. 7.1) их прочностных свойств: а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

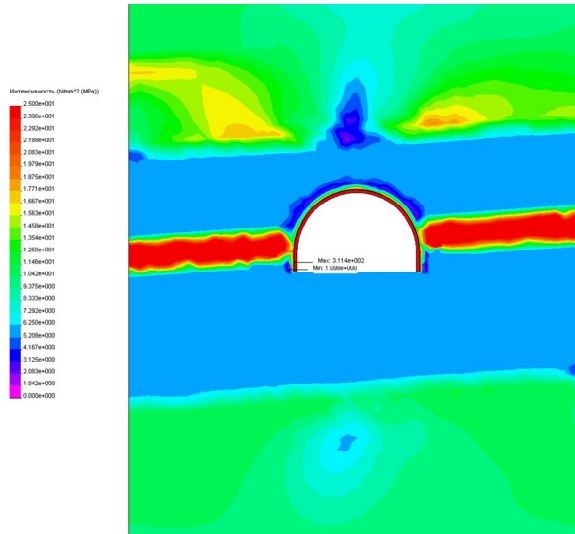


Рис. 10.14. Эпюры распределения приведенных напряжений σ при пониженных деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев по варианту №10 (см. табл. 7.1) их прочностных свойств: а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

10.2. ПОЛЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ

Вполне очевидно, что поле перемещений вмещающих выработку пород существенно зависит от вида состояния окружающей углевмещающей толщи, которое (как было установлено на предыдущем этапе) определяется соотношением прочностных характеристик слагающих породных слоев и глубины расположения выработки.

Анализ закономерностей связи поля перемещений с глубиной расположения выработки выполнен с варианта пониженных прочностных и деформационных характеристик всех близлежащих породных слоев (рис. 10.15 и рис. 8.2, а). При $H = 200$ м некоторая часть углевмещающей толщи находится в допредельном состоянии, поэтому перемещения достаточно умеренные (230–480 мм), а их особенности распределения подробно описаны в §8.1 и §9.2. При $H = 200$ м большая часть близлежащих породных слоев переходит в предельное состояние, вызывающее рост перемещений в массиве, в том числе и на контуре выработки. Это изменение состояния части массива порождает явно выраженную нелинейную связь перемещений с глубиной расположения выработки. Например, при увеличении H в два раза (с 200 м до 400 м) смещения в кровле штрека возрастают в 2,7...2,9 раза, в боках и почве – в 2,5...2,8 раза; в качественном плане несколько преобразуется эпюра распределения перемещений по контуру выработки с меньшим градиентом изменения смещений в кровле и почве. При $H = 600$ м поле перемещений еще более изменяется как в качественном, так и количественном отношении, что связано с переходом не только в предельное, но и запредельное состояние подавляющей части углевмещающего массива:

- во-первых, эпюра перемещений приобретает более асимметричный вид относительно вертикальной оси выработки: смещения почвы и боков штрека несколько преобладают со стороны восстания пласта;

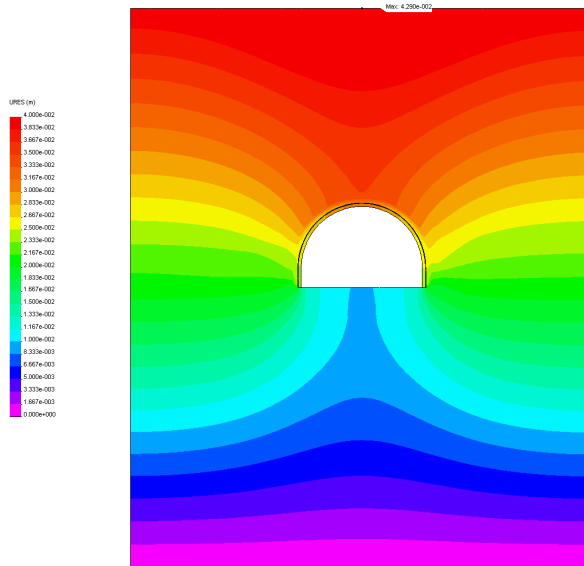
- во-вторых, смещения кровли и почвы настолько велики (до 2,8 м в кровле и 1,8 м в почве), что порода практически заполняет всю полость выработки, что объясняется процессом разрыхления значительного объема массива в ее окрестности;

- в-третьих, смещения пород под опорами стоек рамы достигают 0,7...1,2 м с каждой стороны, что также приводит к полной потере устойчивости крепи и выработки в целом.

Перечисленные факторы свидетельствуют о невозможности эксплуатации выработки в рассмотренной горно-геологической ситуации без применения соответствующих технических мероприятий.

Увеличение модуля деформации всех близлежащих породных слоев с $0,3 \cdot 10^4$ МПа до $1 \cdot 10^4$ МПа при пониженной их прочности приводит к следующим результатам (рис. 10.16 и рис. 9.9, б). Общая тенденция влияния увеличения $E_i^{K,II}$ такова, что смещения массива в любой точке снижаются при

а)



б)

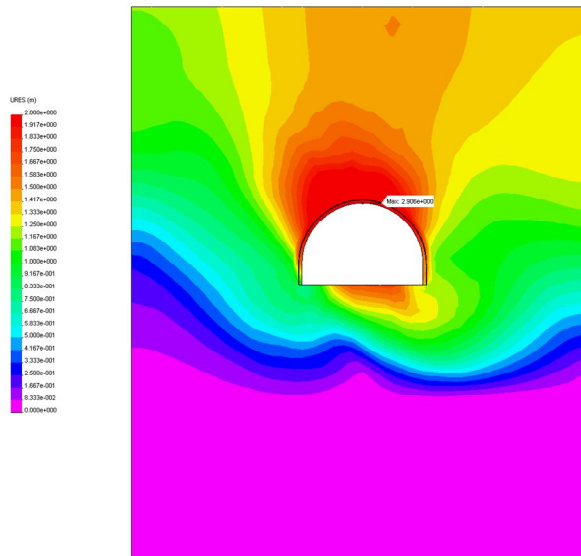
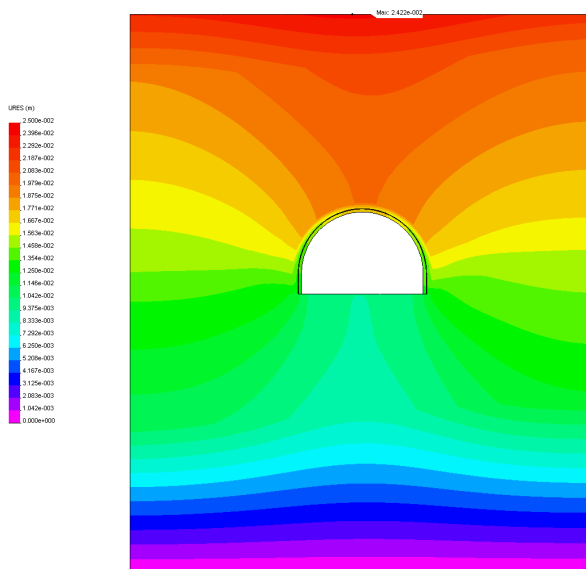


Рис. 10.15. Эпюры перемещений в системе при пониженных прочностных и деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев: а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

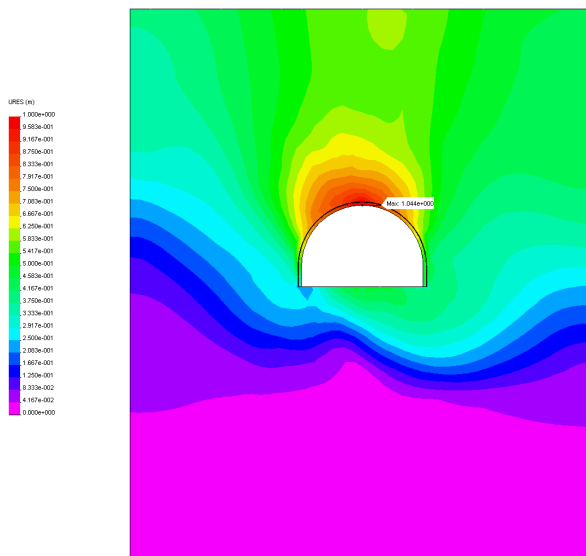


Рис. 10.16. Эпюры перемещений в системе при пониженных прочностных и повышенных деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев: а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

любой глубине расположения выработки: при $H = 200$ м – в 1,5...1,7 раза в кровле и боках выработки (в почве смещения практически не изменяются); при $H = 400$ м – в 1,7...2,3 раза; при $H = 600$ м – в 2,1...2,2 раза в кровле, в 1,7...1,9 раза в боках и в 2,0...2,5 раза в почве. Отсюда следует вывод, что в запредельном состоянии близлежащих породных слоев усиливается влияние их деформационных характеристик, особенно в почве выработки. Здесь величина пучения составляет всего 370...650 мм и позволяет после соответствующих ремонтно-восстановительных работ эксплуатировать выработку.

Установленное существенное влияние деформационных характеристик всей группы близлежащих слоев было проанализировано послойно и выявлен факт превалирующего влияния E_1^K и E_1^H на поле перемещений, в то время, как влияние E_2^K оценивается в основном до 15...25% независимо от состояния вмещающего массива (рис. 10.17 и рис. 9.9, а).

Повышенные прочностные характеристики всех близлежащих породных слоев коренным образом изменяют не только напряженное, но и деформированное состояние углевмещающей толщи.

При пониженных деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев установлены следующие особенности изменения поля перемещений с ростом H (рис. 10.18 и рис. 8.2, б):

- при разной глубине расположения выработки качественная эпюра перемещений в массиве практически постоянна;

- смещения породного контура выработки даже при $H = 600$ м относительно невелики (в кровле – до 490 мм, в почве – до 430 мм, в боках – до 170 мм), что обусловлено преимущественно допредельным состоянием углевмещающей толщи;

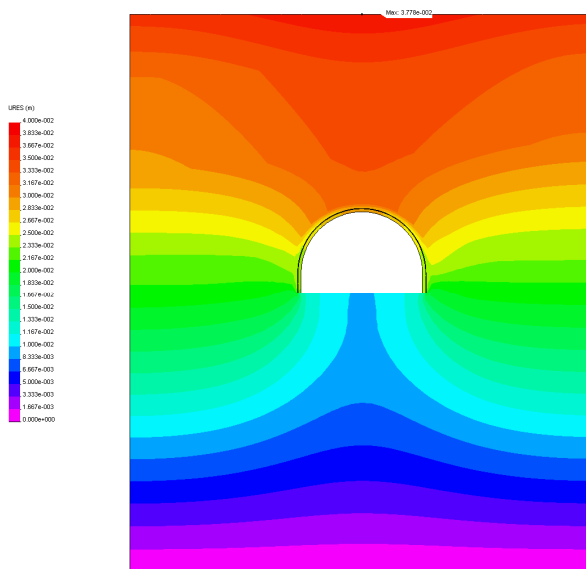
- по этой же причине наблюдается близкая к линейной связь величины перемещения в какой-либо точке массива с глубиной расположения выработки.

Повышенные деформационные характеристики всех близлежащих породных слоев (см. рис. 10.19 и рис. 9.10, б) не изменяют предыдущих выводов с учетом того, что величина смещения породного контура выработки снижается в кровле и боках в 1,7...2,0 раза.

Изменение деформационных характеристик второго слоя кровли мало изменяет поле перемещений со всеми его особенностями, выявленными ранее (рис. 10.20 и рис. 9.10, а).

В заключении данного этапа исследований оценим влияние прочностных и деформационных характеристик второго породного слоя кровли на тенденции изменения поля перемещений с ростом глубины расположения выработки. Установлено, что влияние деформационных характеристик второго слоя кровли при различных сочетаниях прочностных свойств близлежащих породных слоев с увеличением параметра H аналогично ранее описанным вариантам. Что касается прочностных характеристик второго слоя кровли, то здесь выявлено неоднозначное их влияние в зависимости от вида состояния

а)



б)

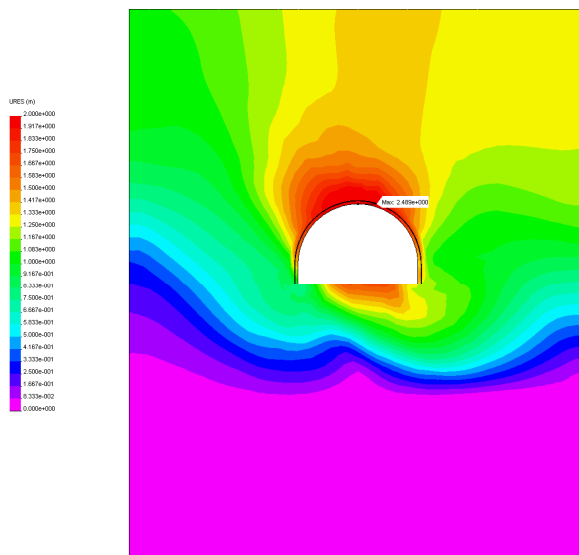
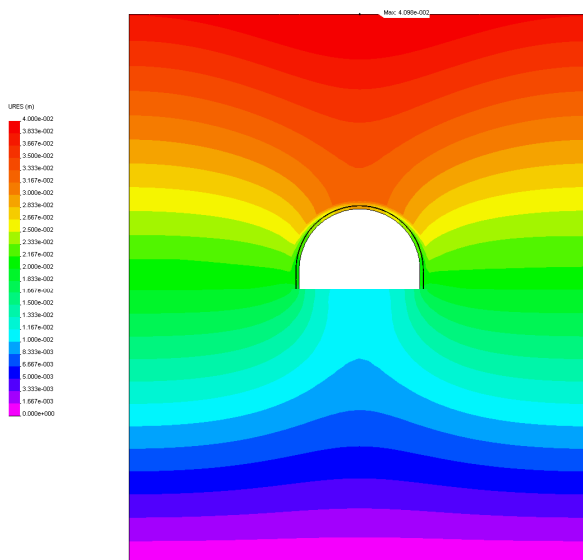


Рис. 10.17. Эпюры перемещений в системе при пониженных прочностных характеристиках всех близлежащих породных слоев по варианту №10 (см. табл. 5.1) их деформационных свойств:
а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

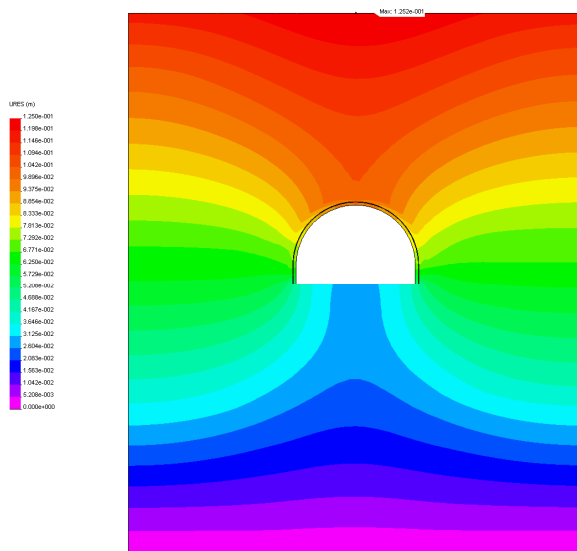
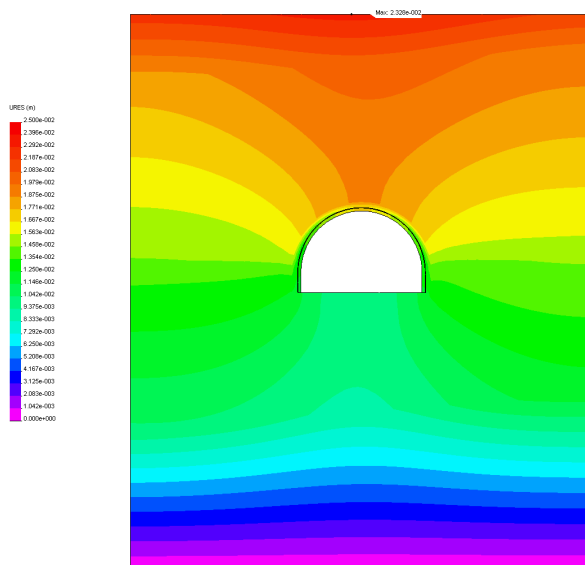


Рис. 10.18. Эпюры перемещений в системе при повышенных прочностных и пониженных деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев: а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

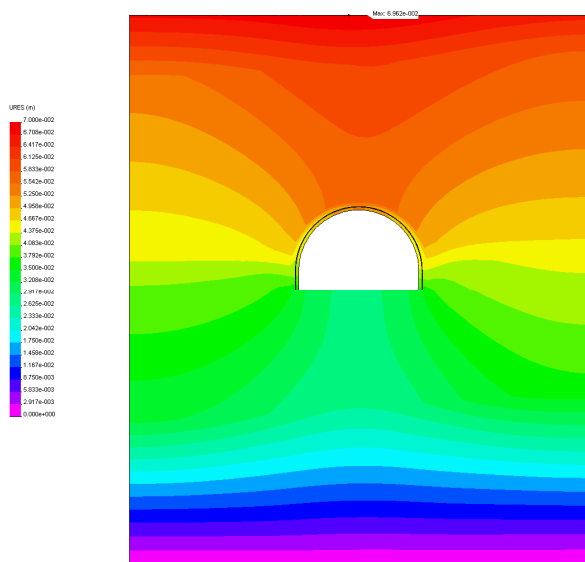
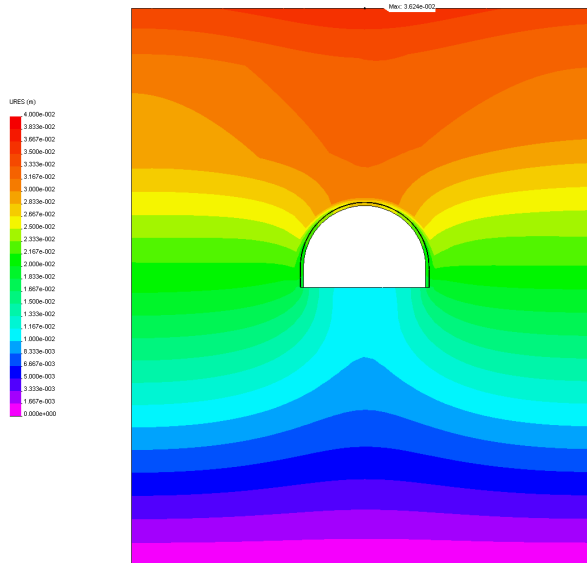


Рис. 10.19. Эпюры перемещений в системе при повышенных прочностных и деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев: а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

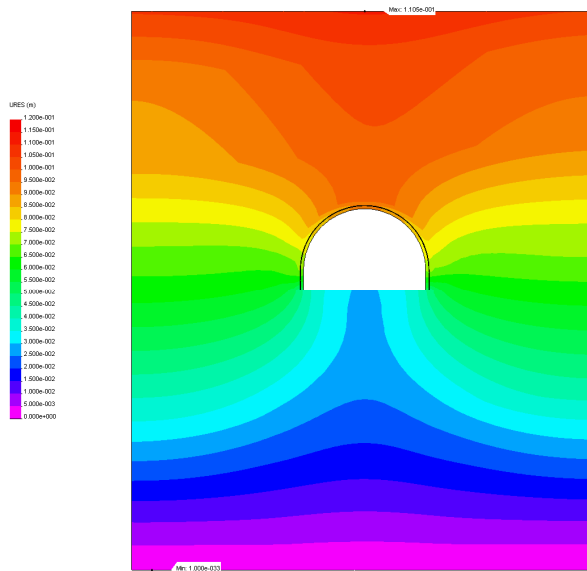


Рис. 10.20. Эпюры перемещений в системе при повышенных прочностных и деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев по варианту №10 (см. табл. 5.1) их деформационных свойств:
а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

первых породных слоев кровли и почвы. При повышенных прочностных характеристиках первых слоев кровли и почвы (рис. 10.21 и рис. 8.3, а; рис. 10.22 и рис. 10.8, б) переход второго породного слоя кровли в предельное состояние из-за пониженной прочности способствует росту перемещений породного контура выработки лишь до 20...28%. Это обусловлено частично допредельным состоянием породных слоев, непосредственно примыкающим к выработке, даже на глубине 600 м. Когда же первые слои кровли и почвы с ростом глубины расположения выработки переходят в предельное (запредельное) состояние (рис. 10.23 и рис. 8.3, б; рис. 10.24 и рис. 9.12, б), то повышенная прочность второго слоя кровли позволяет ограничить смещения породного контура выработки на 29...56%.

Результаты проведенных исследований тенденций роста перемещений породного массива в полость выработки с увеличением глубины ее размещения позволили сформулировать ряд выводов.

Во-первых, различные варианты распределения прочностных и деформационных характеристик близлежащих породных слоев обуславливают разную степень их влияния на смещения породного контура выработки с ростом глубины разработки. Определяющим фактором является вид состояния близлежащих породных слоев при конкретной величине параметра H : допредельное, предельное, запредельное.

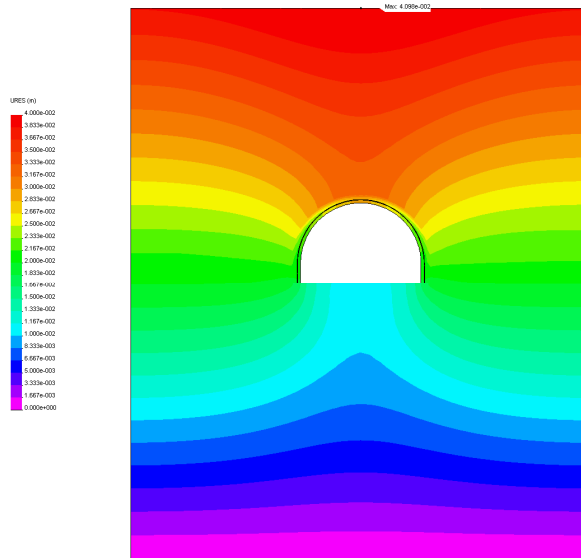
Во-вторых, при повышенных прочностных характеристиках близлежащих породных слоев их частично допредельное состояние предопределяет близкую к линейной – связь перемещений с параметром H , при которой колебания их деформационных свойств в диапазоне $E_i^{K,II} = (0,3...1) \cdot 10^4$ МПа изменяют величину перемещений до 70...100%.

В-третьих, при пониженных прочностных характеристиках породных слоев зависимость перемещений контура выработки от H становится нелинейной с наступлением предельного состояния хотя-бы одного из слоев, а в запредельном состоянии интенсивность роста смещений многократно увеличивается, что выводит выработку из эксплуатационного состояния. Отмеченный всплеск развития смещений породного контура обусловлен некоторыми граничными соотношениями прочностных и деформационных характеристик близлежащих породных слоев, а также глубины расположения выработки, что требует проведения специальных исследований по их выявлению и разработке на этой основе рекомендаций по прогнозу процессов сдвижения слабого слоистого массива в окрестности пластовой выработки.

Более углубленное исследование влияния параметров запредельного состояния $\frac{M}{E}$ и $\frac{\sigma_{сж}^0}{\sigma_{сж}}$ необходимо по ряду объективно существующих факторов:

– аналитические исследования [135] подтверждают весьма тесную связь между процессом развития смещений породного контура и параметрами $\frac{M}{E}$ и

а)



б)

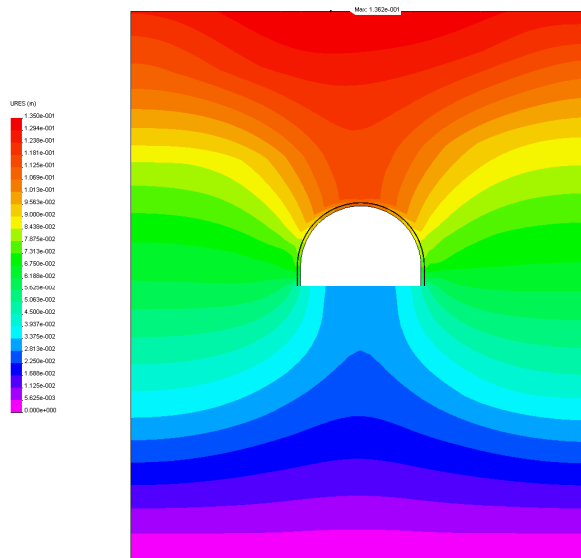
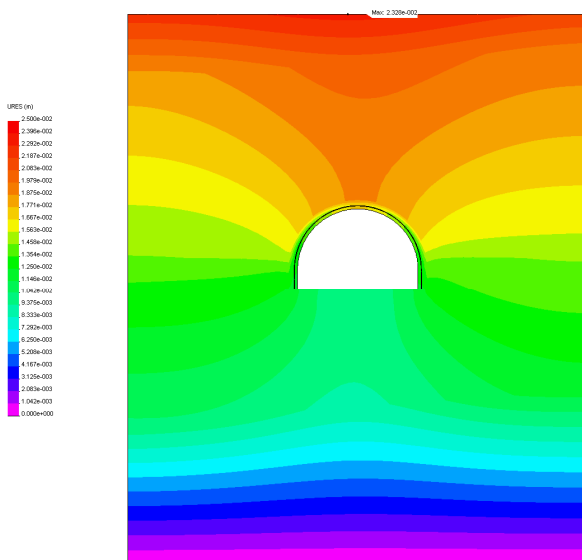


Рис. 10.21. Эпюры перемещений в системе при пониженных прочностных и деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев по варианту №7 (см. табл. 7.1) их прочностных свойств:
а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

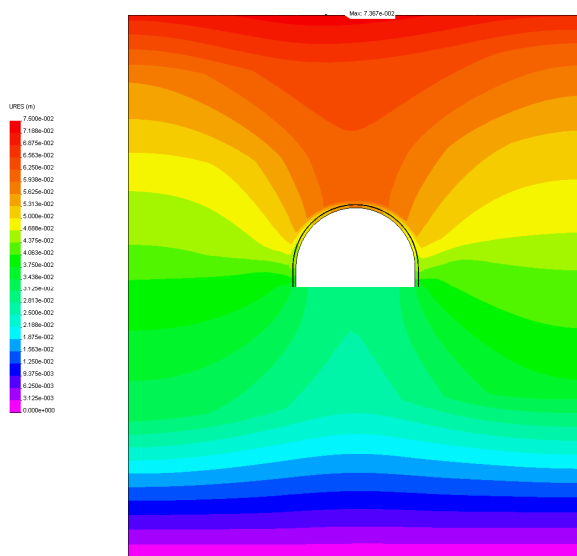
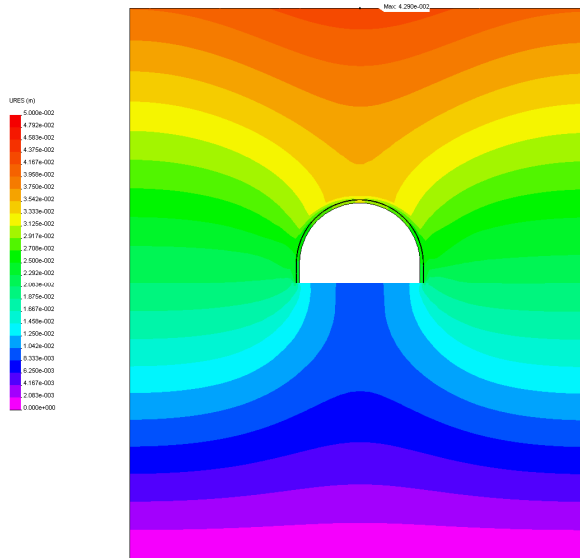


Рис. 10.22. Эпюры перемещений в системе при повышенных деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев по варианту №7 (см. табл. 7.1) их прочностных свойств: а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

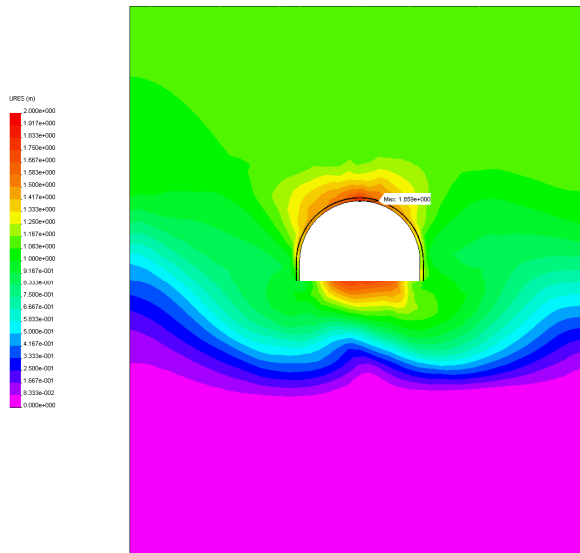
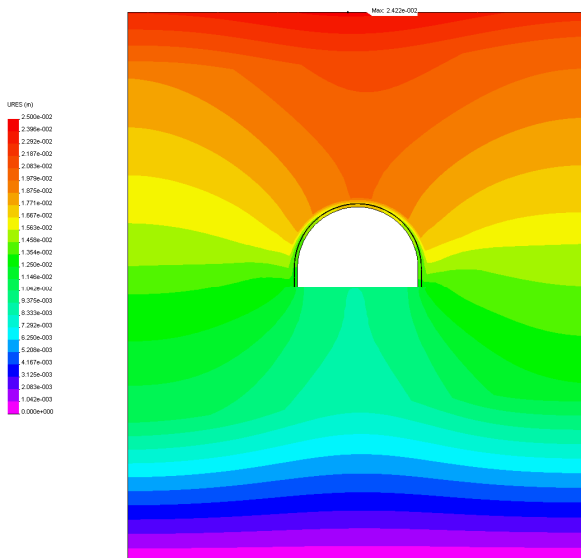


Рис. 10.23. Эпюры перемещений в системе при пониженных деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев по варианту №10 (см. табл. 7.1) их прочностных свойств: а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

а)



б)

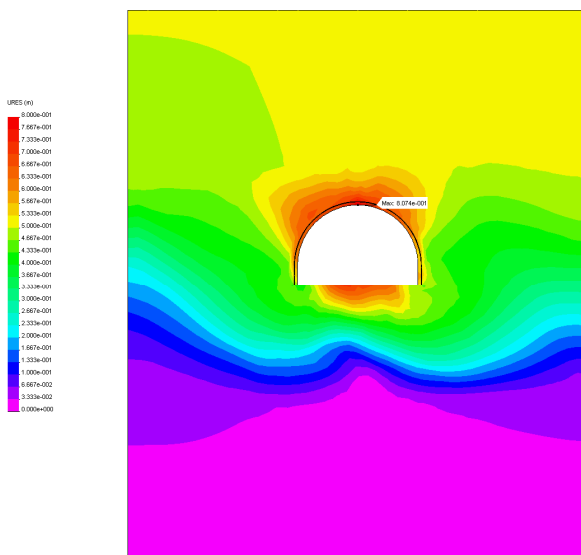


Рис. 10.24. Эпюры перемещений в системе при повышенных деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев по варианту №10 (см. табл. 7.1) их прочностных свойств: а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

$\frac{\sigma_{сж}^0}{\sigma_{сж}}$ запредельного деформирования породных слоев;

– экспериментальные (лабораторные и шахтные) исследования далеко не всегда отмечают «некоторую» критическую область соотношения геомеханических параметров, при которых резко возрастают смещения породного контура выработки; наряду с наличием указанного явления существуют и случаи более плавного процесса развития смещений с ростом глубины разработки;

– собственные выборочные расчеты НДС модели указывают, что «всплеск» развития смещений может практически отсутствовать при определенных сочетаниях $\frac{M}{E}$ и $\frac{\sigma_{сж}^0}{\sigma_{сж}}$: при этом связь $U(x, y)$ с H остается не-

линейной, но сами смещения более активно развиваются в «докритической» области и менее активно в «закритической» области соотношения геомеханических параметров.

Данные аспекты являются предметом дальнейших исследований НДС системы «массив-крепь».

10.3. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАМНОЙ КРЕПИ

Анализ связи приведенных напряжений в рамной крепи с глубиной расположения выработки выполнен для наиболее «разнополюсных» вариантов распределения прочностных и деформационных характеристик близлежащих породных слоев.

При пониженных прочностных и деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев связь σ и H имеет следующие черты (рис. 10.25 и рис. 8.8, а):

– максимумы σ в раме стабильно располагаются на прямолинейных участках ее стоек независимо от параметра H , что объясняется действием повышенных изгибающих моментов именно на этих участках из-за интенсивного сдвижения приконтурных пород в боках и почве выработки, характерного для слабых пород слоистого массива;

– наиболее нагруженными участками являются стойки рамы, которые из упругого состояния при $H = 200$ м переходят в основном в пластическое ($H = 400$ м) по вышеприведенным причинам;

– по мере увеличения H относительно разгруженный ($\sigma = (0,48...0,63)\sigma_T$) свод рамы ($H = 200$ м) переходит в пластическое или близкое к нему состояние ($\sigma = (0,93...1)\sigma_T$), а материал замка свода при $H = 600$ м переходит площадку текучести и находится на участке упрочнения стали Ст.5; это обусловлено чрезвычайно интенсивными смещениями близлежащих породных слоев,

находящихся в запредельной стадии деформирования.

Таким образом, с ростом глубины размещения выработки рамная крепь переходит в предельное состояние с образованием целого ряда пластических шарниров по ее контуру, которые, с одной стороны, придают раме повышенную податливость в наиболее нагруженных сечениях, а, с другой стороны, способствуют деформированию рамы, исключая возможность эксплуатации выработки.

Повышенные деформационные характеристики всех близлежащих породных слоев при их пониженных прочностных свойствах не изменяют отмеченные выше закономерности связи σ и H (рис. 10.26 и рис. 9.13, б). Отличие заключается в пониженных (до 53%) напряжениях σ только на стадии упругого деформирования рамы ($H = 200$). С увеличением H влияние деформационных характеристик близлежащих породных слоев значительно ослабевает в связи с их переходом в предельное и запредельное состояния.

Повышенные прочностные характеристики близлежащих породных слоев в основном не изменяют тенденций связи σ и H (рис. 10.27 и рис. 8.8, б; рис. 10.28 и рис. 9.14, б), установленные для вариантов пониженных прочностных характеристик. Однако имеются и некоторые особенности:

- во-первых, при $H = 200$ м рама находится в более нагруженном (хотя и упругом) состоянии как в своде, так и в стойках, что можно объяснить наличием только локальных областей предельного состояния в приконтурных породах и по этой причине менее равномерным нагружением рамы (по ее контуру) от деформирующегося массива;

- при $H = 400$ м большая часть свода рамы еще находится в упругом состоянии из-за влияния зоны разгрузки в породах кровли, находящихся на стадии допредельного деформирования;

- по этой же причине даже на глубине 600 м в районе замка свода рамы еще имеется область упругого напряженного состояния ее материала;

- повышенные деформационные характеристики близлежащих породных слоев еще более ограничивают смещения породного контура выработки, в результате чего напряжения σ в раме снижаются на 29...55% и даже при $H = 600$ м большая часть свода рамы находится в упругом состоянии.

Другие варианты распределения прочностных и деформационных характеристик по близлежащим породным слоям подтверждают выявленные тенденции связи параметров σ и H .

Таким образом, на НДС рамной крепи оказывают существенное влияние как прочностные, так и деформационные характеристики близлежащих породных слоев. Поэтому для обоснованного выбора рамной крепи пластовой выработки необходимо установить уравнения связи σ с основными влияющими геомеханическими параметрами.

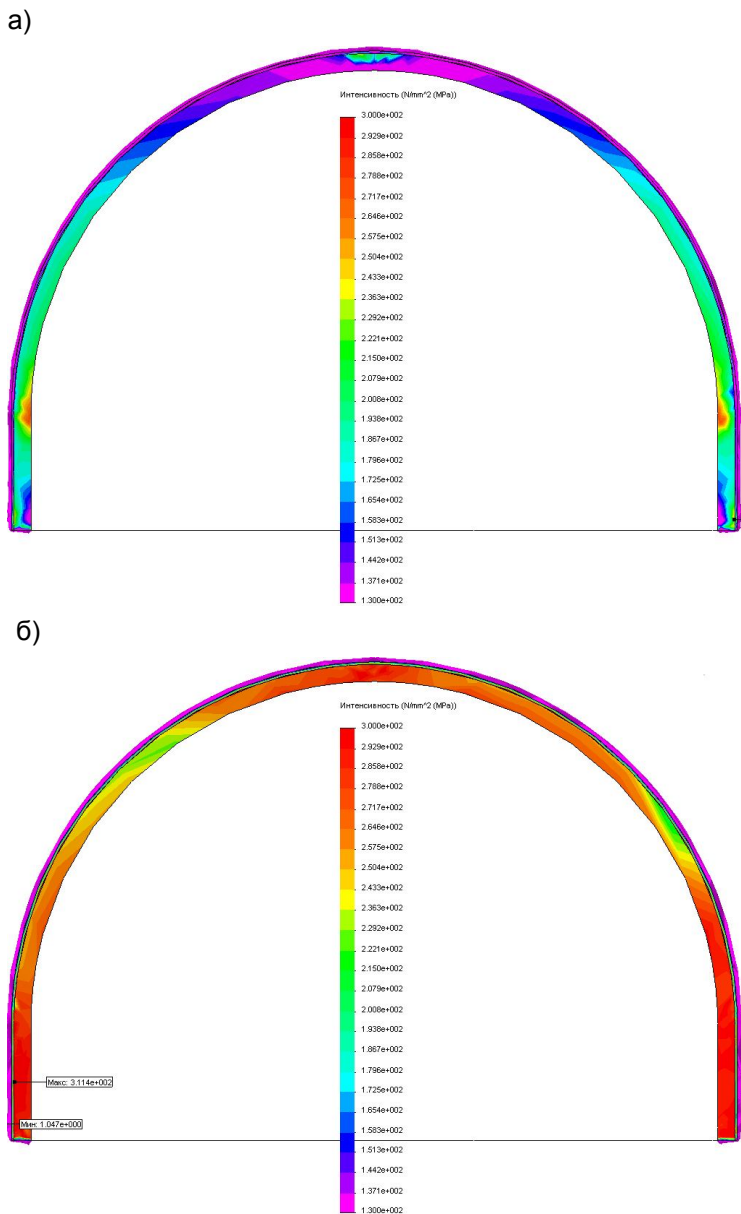


Рис. 10.25. Эпюры приведенных напряжений σ в рамной крепи при пониженных прочностных и деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев: а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

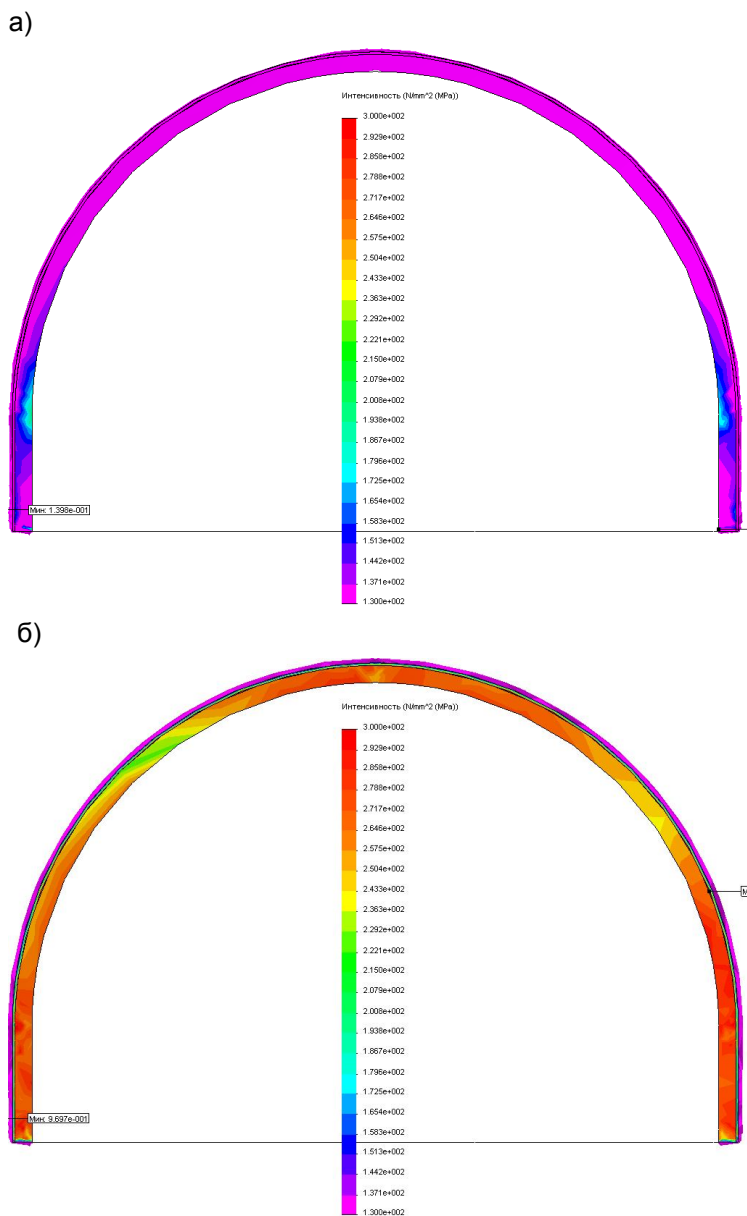


Рис. 10.26. Эпюры приведенных напряжений σ в рамной крепи при пониженных прочностных и повышенных деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев: а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

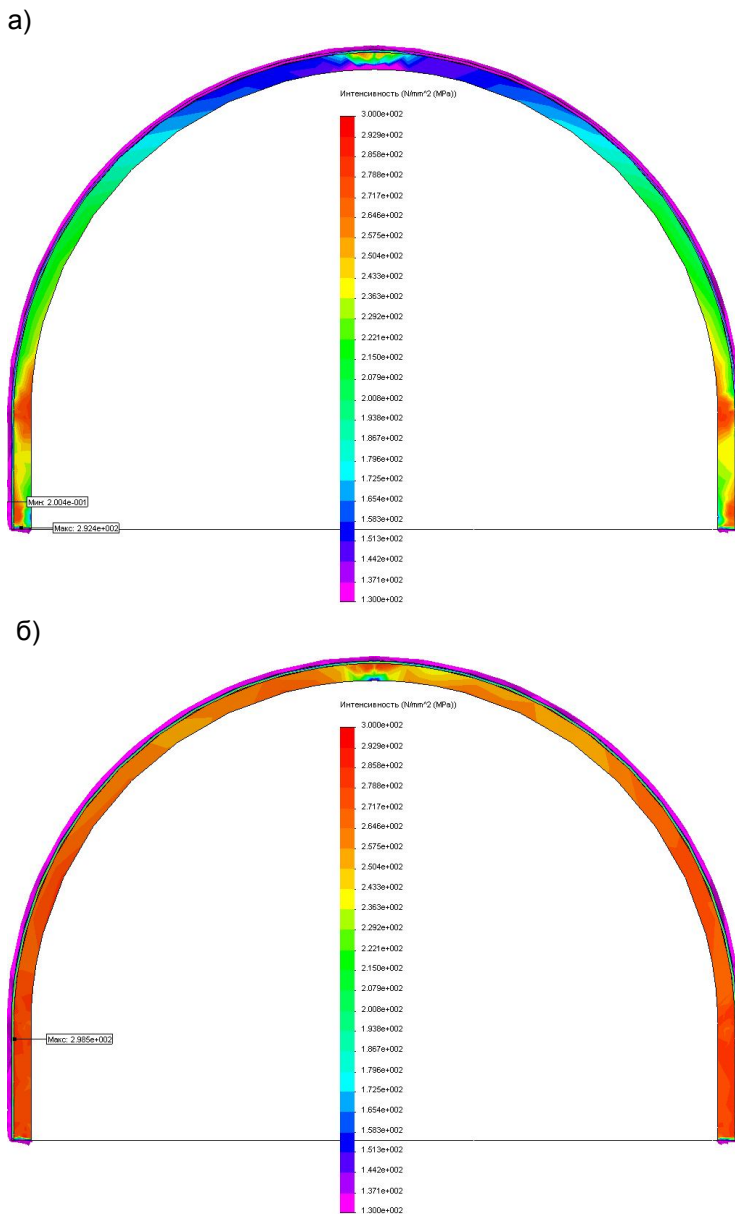


Рис. 10.27. Эпюры приведенных напряжений σ в рамной крепи при повышенных прочностных и пониженных деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев: а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

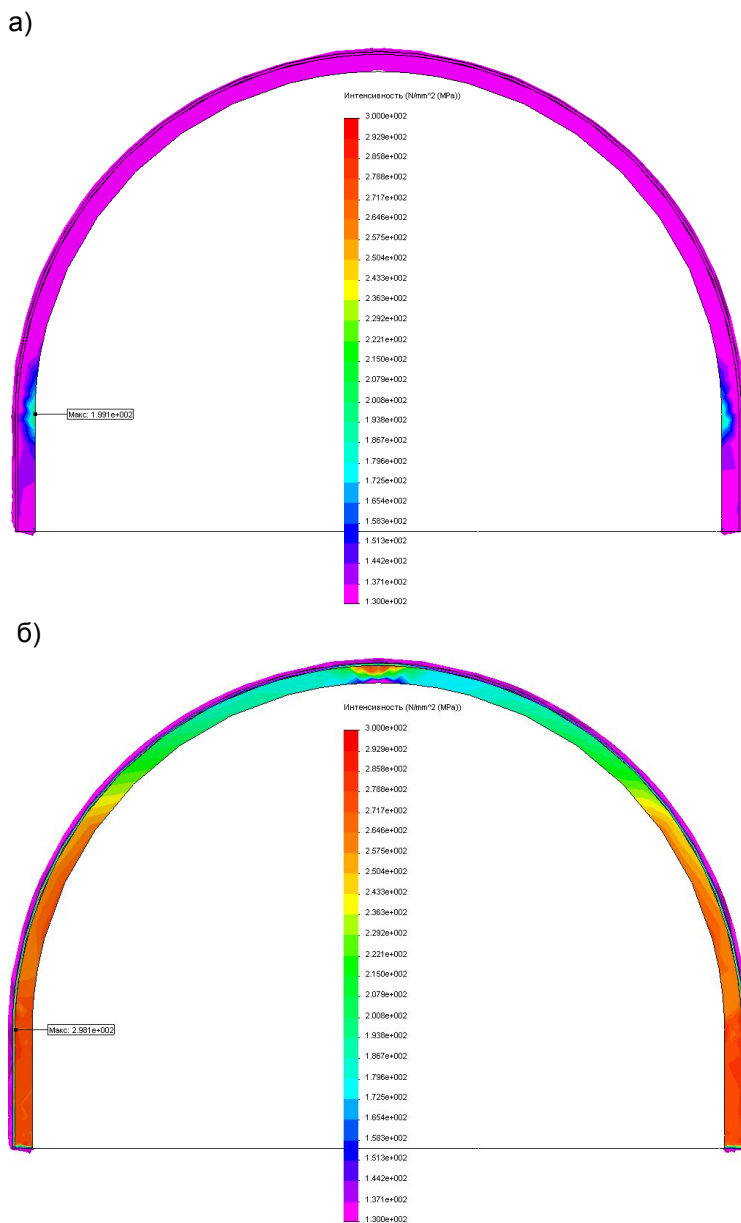


Рис. 10.28. Эпюры приведенных напряжений σ в рамной крепи при повышенных прочностных и деформационных характеристиках всех близлежащих породных слоев: а) $H = 200$ м; б) $H = 600$ м

Максимум приведенных напряжений в рамной крепи определяется:

$$\sigma_{max} = \sigma_1 - \sigma_3 ;$$

$$\sigma_{max} = 24,6 - 18,6 \cdot 10^{-4} \left(0,8E_1^{\Pi} + 0,2E_1^K \right) +$$

$$+ \left[0,59 - 0,37 \cdot 10^{-4} \left(0,45E_1^{\Pi} + 0,45E_1^K + 0,1E_2^K \right) \right] H , \text{ МПа.}$$

Здесь $E_i^{K,\Pi}$ подставляется в МПа; H – в метрах.

Уравнение регрессии связи максимумов приведенных напряжений σ_{max} в рамной крепи с геомеханическими параметрами поддержания пластовой выработки получено по графикам на рис 9.4. Это уравнение позволяет оценить состояние рамной крепи в конкретных горно-геологических условиях эксплуатации выработки.

ВЫВОДЫ

По результатам исследований, изложенных в разделе 3, сформулирован ряд выводов.

1. Установлено, что предельное (запредельное) состояние системы «массив-крепь» может наступить в различных областях каждого из слагающих ее элементов. Поэтому выполнено обоснование полных диаграмм деформирования всех составляющих элементов системы, включая стадию разрыхления каждого из породных слоев и угольного пласта.

2. Различные сочетания распределения прочностных и деформационных характеристик по каждому из близлежащих породных слоев обуславливают разную степень их влияния на изменение поля напряжений и перемещений с ростом глубины расположения выработки. Определяющим фактором является вид состояния близлежащих породных слоев при конкретной величине параметра H : допредельное, предельное, запредельное.

3. При повышенных прочностных характеристиках близлежащих породных слоев их частично допредельное состояние предопределяет связь напряжений и перемещений с параметром H , близкую к линейной; колебания деформационных свойств породных слоев в интервале $E_i^{K,\Pi} = (0,3...1) \cdot 10^4$ МПа изменяют напряжения до 55%, а величину перемещений до 131%.

4. При пониженных прочностных характеристиках близлежащих породных слоев зависимость НДС массива от параметра H становится нелинейной с наступлением предельного состояния хотя бы одного из слоев, а в запредельном состоянии интенсивность роста перемещений многократно увеличивается, а напряжений уменьшается. При этом деформационные характеристики слоев несущественно влияют на поле напряжений, а смещения породного контура выработки, особенно в ее почве могут изменяться до 2,5 раз.

5. Выявлена достаточная независимость поля напряжений породного слоя от вида состояния соседних слоев:

– во-первых, слои пониженной прочности с ростом H переходят в предельное (запредельное) состояние практически независимо от прочностных характеристик соседних более крепких породных слоев;

– во-вторых, поле напряжений в породных слоях с более высокими прочностными характеристиками в малой степени зависит от перехода соседнего слоя в предельное состояние;

– в-третьих, поле напряжений в угольном пласте, втором слое почвы и третьем слое кровли достаточно стабильно по отношению к виду состояния какого-либо близлежащего породного слоя.

6. НДС рамной крепи и закономерности его изменения с ростом глубины расположения выработки находится в тесной связи с прочностными и деформационными характеристиками близлежащих породных слоев, но являются нелинейными, особенно при переходе слоев в предельное и запредельное состояние. Затухание роста функции $\sigma(H)$ обусловлено появлением и увеличением зон пластических деформаций в раме; этот процесс стабильно начинается в нижней части стоек рамы (они изгибаются в полость выработки) и распространяется с ростом H почти по всему контуру рамы (за исключением локальных областей допредельного состояния в своде). Образование системы пластических шарниров по контуру рамной крепи способствуют (в ряде случаев) развитию таких ее деформаций, которые исключают возможность дальнейшей эксплуатации выработки.

11. ЗАКОНОМЕРНОСТИ СВЯЗИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ КОНТУРА ВЫРАБОТКИ С ГЕОМЕХАНИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ СИСТЕМЫ «МАССИВ-КРЕПЬ»

В первую очередь следует подчеркнуть, что задача оценки устойчивости пластовой выработки ставится в более широком понимании в сравнении с традиционно принятыми представлениями: необходимо прогнозировать ее состояние в плане сохранения (или потери) эксплуатационных характеристик по комплексу конструктивно-технологических норм надежного функционирования выработки с учетом соответствующих требований правил безопасности, оценка выполнения которых производится по эпюрам прогнозируемых перемещений контура выработки и сравнения с допустимыми перемещениями на определенных участках ее периметра. Если не выполняются требования надежного и безопасного функционирования выработки, то вопрос ее устойчивости, как искусственного горнотехнического сооружения, приобретает первостепенное значение, так как дальнейшая эксплуатация выработки недопустима без проведения определенных ремонтно-восстановительных работ.

Для реализации данного подхода необходимо разработать методику прогноза перемещений любой точки контура пластовой выработки, то есть определение эпюры перемещений ее поперечного сечения. Необходимость расчета эпюры перемещений по всему контуру поперечного сечения связана с тем, что различные требования надежного и безопасного функционирования выработки касаются различных участков ее периметра. С другой стороны, существующие нормативные методики [156, 157, 164] дают только усредненный прогноз перемещений в целом по кровле, бокам и почве выработки, хотя шахтные наблюдения указывают на крайнюю неравномерность сдвига углевмещающей толщи на каждом из отмеченных участков контура выработки.

В предыдущих разделах изложены тенденции влияния на поле напряжений и перемещений в системе «массив-крепь» основных геомеханических факторов: прочностных и деформационных характеристик углевмещающей толщи, а также глубины расположения выработки. Выявлено, что определенное сочетание этих факторов предопределяет вид состояния (допредельное, предельное, запредельное) близлежащих породных слоев и угольного пласта, который, в свою очередь, оказывает решающее воздействие на развитие эпюры смещений контура выработки. Поэтому главная задача настоящего раздела заключается в установлении закономерностей связи эпюры смещений контура выработки с основными геомеханическими факторами с целью последующей разработки методики прогноза проявлений горного давления и оценки выполнения эксплуатационных требований правил безопасности и устойчивости пластовой выработки, сооружаемой в слоистом массиве слабых пород.

11.1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Для построения эпюры смещений по контуру выработки выделен ряд точек, совпадающих с узлами конечно-элементной сетки (рис. 11.1). Эти точки пронумерованы от 1 до 22 по движению часовой стрелки и принципы их расположения продиктованы стремлением, с одной стороны, получить наиболее точную эпюру перемещений контура выработки $U(x, y)$, а с другой, – ограничить объем расчетов:

- принята симметричная относительно вертикальной оси выработки схема расположения замерных точек для выявления возможной асимметрии эпюры $U(x, y)$, обусловленной пологом $\alpha \leq 6^\circ$ падением угольного пласта;

- в своде рамы замерные точки расположены равномерно через каждые 15° в интервале $\theta = 0 \dots 90^\circ$;

- в прямолинейной части стойки рамы размещены три замерные точки (в опоре стойки, конце ее прямолинейного участка и по его середине) для более точного выявления ее изгиба;

- по ширине почвы выработки замерные точки размещены равномерно для более наглядного отображения неравномерного характера пучения пород почвы.

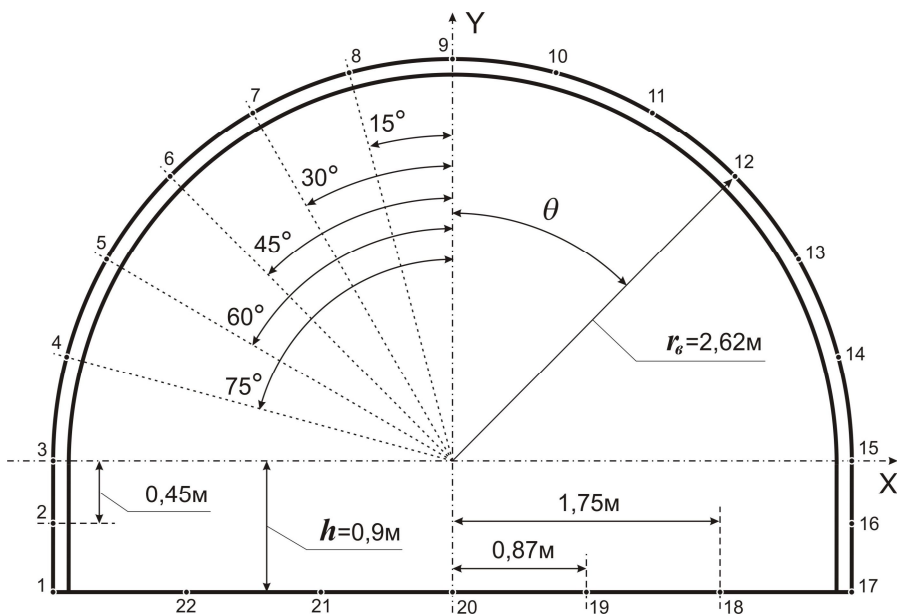


Рис. 11.1. Схема расположения замерных точек по контуру выработки

Результаты замеров эпюры смещений контура выработки представляются для анализа следующим образом (рис. 11.2).

Во-первых, для каждого из вариантов расчета строится новый контур выработки (соответствующий какому-либо фиксированному значению глубины ее расположения) и определяется площадь сечения S выработки внутри ее изменившегося контура. Зная первоначальную площадь поперечного сечения выработки S_0 , определяется безразмерный параметр $\frac{S}{S_0}$ – относитель-

ное изменение площади поперечного сечения пластовой выработки, который нередко используется в современных исследованиях [165, 166] для оценки устойчивости выработки и степени ее пригодности для дальнейшей эксплуатации, в том числе, по факторам транспорта и эффективности проветривания участка шахтного поля.

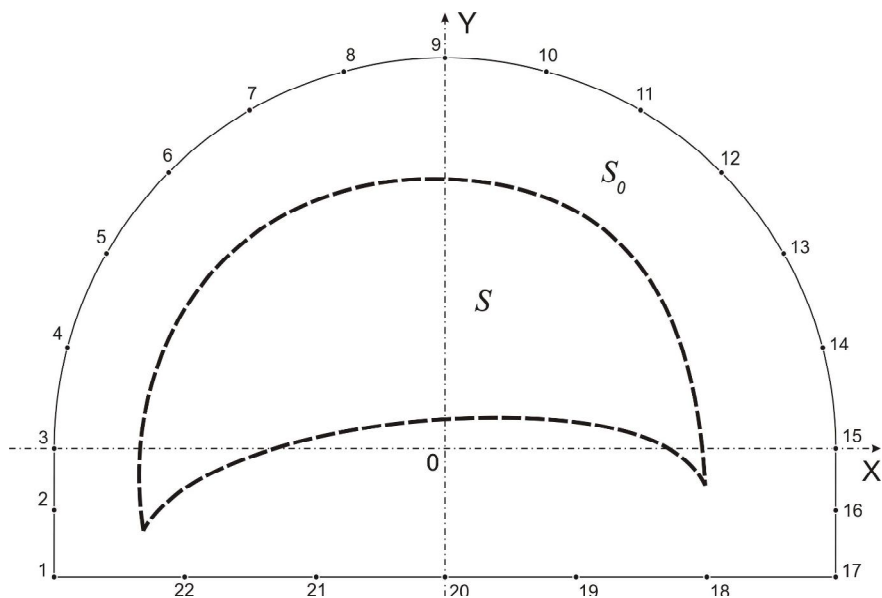


Рис. 11.2. Схема к выполнению анализа результатов замера смещений контура выработки

Во-вторых, существует ряд ограничений на допустимую величину смещения контура выработки (на разных участках ее периметра) исходя из комплекса требований ее надежной и безопасной эксплуатации [168, 169], например, допустимая величина вертикальной и боковой податливости крепи; минимально допустимые зазоры для безопасного прохода людей и движения подвижного состава, других транспортных средств; максимально допустимая (с точки зрения сохранности рельсового пути) величина пучения пород почвы и др. Эти требования отчасти индивидуальны в зави-

симости от типа и назначения выработки. Поэтому, отдельно от параметра $\frac{S}{S_0}$, необходимо установить закономерности изменения смещений контура выработки в следующих точках (см. рис. 11.1):

- точка 9 – максимальное опускание свода кровли;
- точка 20 – максимальное поднятие почвы;
- точки 4, 14 и 5, 13 – сближение боков выработки в зоне прохода людей;
- точки 1, 17 – сближение боков выработки по ее почве, а также вдавливание опор стоек рамы в почву;
- точки 18, 22 – поднятие почвы в зоне прохода людей.

Такая методика исследований потребовала проведения комплекса дополнительных расчетов для обеспечения достоверных результатов на всем диапазоне изменения геомеханических параметров (в том числе характеристик запредельного состояния) пластовых выработок шахт Западного Донбасса. Поэтому, в дополнение к уже выполненным расчетам произведена

оценка степени влияния параметров $\frac{(\sigma_{сж_i}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,П}}$ и $\frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}}$ запредельного состояния каждого из слоев.

Первая особенность связи эпюры перемещений контура выработки с механическими характеристиками углевмещающей толщи состоит в том, что наблюдаются стабильные закономерности изменения функции $U(x, y) = \Phi(E_i^{K,П})$

вне зависимости от параметров $\sigma_{сж_i}^{K,П}$, $\frac{(\sigma_{сж_i}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,П}}$ и $\frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}}$ предельного и запредельного

состояния породных слоев. Это позволяет представить эпюру перемещений контура выработки как функцию двух сомножителей

$$U(x, y) = \Phi_1(E_i^{K,П}) \cdot \Phi_2 \left[\sigma_{сж_i}^{K,П}, \frac{(\sigma_{сж_i}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,П}}, \frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}} \right]. \quad (11.1)$$

В свою очередь, вид функции $U(x, y)$ по уравнению (4.1) создает возможность раздельного исследования функций Φ_1 и Φ_2 : расчеты НДС системы по установлению функции Φ_1 изложены в предыдущих разделах; результаты расчетов НДС системы по установлению функции Φ_2 изложены в настоящем разделе и позволяют осуществить моделирование только одного ($E_i^{K,П} = 0,3 \cdot 10^4$ МПа) из 27 вариантов табл. 4.1 соотношения модулей деформации слоев углевмещающей толщи; остальные варианты учитываются

функцией Φ_1 .

Вторая особенность (по результатам предыдущих расчетов и дополнительной оценке влияния характеристик запредельного состояния) однозначно

указывает на взаимовлияние параметров $\sigma_{сж_i}^{K,П}$, $\left(\frac{\sigma_{сж_i}^{K,П}}{\sigma_{сж_i}^{K,П}}\right)^0$ и $\frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}}$ на функ-

цию $U(x, y)$, которое невозможно разделить по аналогии с уравнением (11.1). Тогда в базу вариантов расчета настоящего раздела следует включать все 27 вариантов соотношений $\sigma_{сж_i}^{K,П}$ углевмещающей толщи по табл. 7.1. Однако, установлено, что вся гамма закономерностей развития смещений $U(x, y)$ в предельном и запредельном состояниях с точностью до 10% описывается восемью наиболее «разнополюсными» вариантами по параметру $\sigma_{сж_i}^{K,П}$ из табл. 7.1: №№1, 3, 7, 8, 10, 14, 16, 18. Это позволяет более чем в три раза сократить объем вычислений.

Далее выполнено обоснование диапазона изменения и выбранных фиксированных значений параметров запредельного состояния $\frac{\left(\sigma_{сж_i}^{K,П}\right)^0}{\sigma_{сж_i}^{K,П}}$ и $\frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}}$ породных слоев углевмещающей толщи.

Исследованиями [135, 145, 146, 169] установлено, что в слабых углевмещающих породах (в основном Западного района Донбасса) остаточная прочность на сжатие $\left(\sigma_{сж_i}^{K,П}\right)^0$ составляет 10...20% от прочности на сжатие целостного образца $\sigma_{сж_i}^{K,П}$. Для охвата данного диапазона проведены расчеты НДС системы при различных сочетаниях остаточной прочности каждого из близлежащих породных слоев для двух фиксированных значений $\frac{\left(\sigma_{сж_i}^{K,П}\right)^0}{\sigma_{сж_i}^{K,П}} = 0,1$ и $0,2$, которые сведены в табл. 11.1.

Что касается параметра $\frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}}$ ниспадающей ветви полной диаграммы деформирования породы, то вышеуказанные исследования механических свойств слабых глинистых, песчано-глинистых и песчаных сланцев Западного Донбасса дают достаточно ограниченный интервал изменения $\frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}} = 0,5...3$.

Таблица 11.1

**ВАРИАНТЫ СООТНОШЕНИЙ ПАРАМЕТРА $(\sigma_{сжi}^{K,\Pi})^0 / \sigma_{сжi}^{K,\Pi}$
БЛИЗЛЕЖАЩИХ ПОРОДНЫХ СЛОЕВ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕЙ ТОЛЩИ**

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8
$(\sigma_{сж2}^K)^0 / \sigma_{сж2}^K$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
$(\sigma_{сж1}^K)^0 / \sigma_{сж1}^K$	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2
$(\sigma_{сж1}^\Pi)^0 / \sigma_{сж1}^\Pi$	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2

Более пластичные глинистые сланцы имеют пониженный (усредненный по ниспадающей ветви) модуль спада ($\frac{M}{E} = 0,5...1,5$), песчанистые сланцы склонны к более хрупкому разрушению ($\frac{M}{E} = 2...3$), а песчано-глинистые сланцы занимают промежуточное значение. В этой связи принято ранее рассчитывать НДС системы для группы вариантов, где параметр $\frac{M_i^{K,\Pi}}{E_i^{K,\Pi}}$ зафиксирован двумя значениями 0,5 и 3 для каждого из близлежащих слоев углеводородной толщи (табл. 11.2).

Таблица 11.2

**ВАРИАНТЫ СООТНОШЕНИЙ ПАРАМЕТРА $M_i^{K,\Pi} / E_i^{K,\Pi}$
БЛИЗЛЕЖАЩИХ ПОРОДНЫХ СЛОЕВ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕЙ ТОЛЩИ**

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8
M_2^K / E_2^K	0,5	0,5	0,5	0,5	3	3	3	3
M_1^K / E_1^K	0,5	0,5	3	3	0,5	0,5	3	3
M_1^Π / E_1^Π	0,5	3	0,5	3	0,5	3	0,5	3

Кроме того, ранее просчитана группа вариантов при $\frac{M_i^{K,\Pi}}{E_i^{K,\Pi}} = 1,3$, которые занимают промежуточное значение по исследуемому параметру. Эти расчеты совместно с дополнительными (при необходимости более точного установления закономерностей связи $U(x, y)$ и механических характеристик углеводородной толщи) использованы в разрабатываемой методике прогноза эпюры перемещений контура пластовой выработки.

11.2. ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕГО МАССИВА НА СМЕЩЕНИЯ КРОВЛИ ВЫРАБОТКИ

В соответствии с методикой проведения исследований выполнен комплекс расчетов НДС системы «массив-крепь», результаты которых наиболее наглядно проиллюстрированы семейством графиков опускания

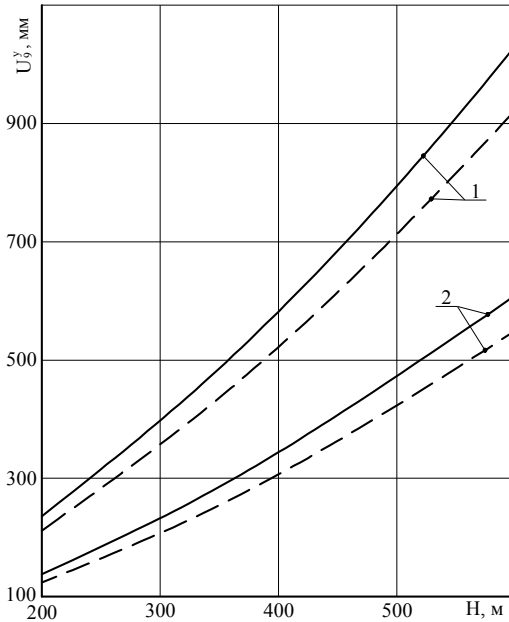


Рис. 11.3. Опускание U_9^y замка свода
выработки с ростом глубины разработки H
при: 1 – $E_1^K = 0,3 \cdot 10^4$ МПа; 2 – $E_1^K = 1 \cdot 10^4$ МПа;
— $E_2^K = 0,3 \cdot 10^4$ МПа; - - - $E_2^K = 1 \cdot 10^4$ МПа

состояния в близлежащих породных слоях. На величину опускания замка свода наибольшее влияние оказывает модуль деформации E_1^K первого породного слоя кровли: увеличение его жесткости ограничивает смещения U_9^y до 1,69 раза. Меньшее влияние оказывает модуль деформации E_2^K второго породного слоя кровли: при его увеличении от $0,3 \cdot 10^4$ МПа до $1 \cdot 10^4$ МПа смещение U_9^y уменьшается до 11%. Влияние модуля деформации $E_1^П$ первого породного слоя почвы не превышает 7,2%.

кровли штрека (по вертикальной координате Y) в зависимости от геомеханических параметров:

$$H, \quad E_i^{K,П}, \quad \frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}}, \quad \sigma_{сжi}^{K,П} \quad \text{и}$$

$$\left(\frac{\sigma_{сжi}^{K,П}}{\sigma_{сжi}^{K,П}^0} \right)^0.$$

Наибольший интерес представляет максимум вертикальных перемещений в замке свода U_9^y и в зоне прохода людей (U_4^y, U_5^y, U_{13}^y и U_{14}^y).

На рис. 11.3 приведены зависимости роста перемещений замка свода U_9^y с увеличением глубины разработки. Функции $U_9^y(H)$ имеют нелинейный характер: по мере роста H смещения U_9^y увеличиваются более интенсивно, что обусловлено ростом зон запредельного

Ограничение опускания замка свода с ростом жесткости близлежащих породных слоев логично и не противоречит соответствующим положениям механики подземных сооружений.

Пример закономерности связи опускания U_9^y замка свода с прочностными характеристиками близлежащих породных слоев приведен на рис. 11.4. Обращает внимание весьма тесная связь перемещений U_9^y с пределом прочности на сжатие первого $\sigma_{сж1}^K$ и второго $\sigma_{сж2}^K$ породных слоев кровли.

Увеличение $\sigma_{сж1}^K$ от 5 МПа до 20 МПа приводит к снижению опускания замка свода в 3,46...4,74 раза при $H = 200$ м и в 3,83...5,52 раза при $H = 600$ м, что объясняется резким ограничением областей запредельного состояния в первом породном слое кровли. Аналогичный эффект наблюдается и во втором породном слое кровли, но уже с менее тесной связью U_9^y и $\sigma_{сж2}^K$ по причине его некоторой удаленности от свода выработки: увеличение $\sigma_{сж2}^K$ от 5 МПа до 20 МПа способствует снижению U_9^y в 1,49...1,79 раза при $H = 200$ м и в 1,55...2,07 раза при $H = 600$ м. Как видим, с увеличением глубины расположения пластовой выработки усиливается влияние прочностных характеристик породных слоев кровли.

Что касается первого породного слоя почвы, то влияние $\sigma_{сж1}^П$ на величину U_9^y менее заметно: при увеличении $\sigma_{сж1}^П$ с 5 МПа до 20 МПа смещения снижаются на 3,9...17,5% при $H = 200$ м и на 2,1...11,6% при $H = 600$ м. При этом наибольшее влияние $\sigma_{сж1}^П$ оказывает при умеренных перемещениях замка

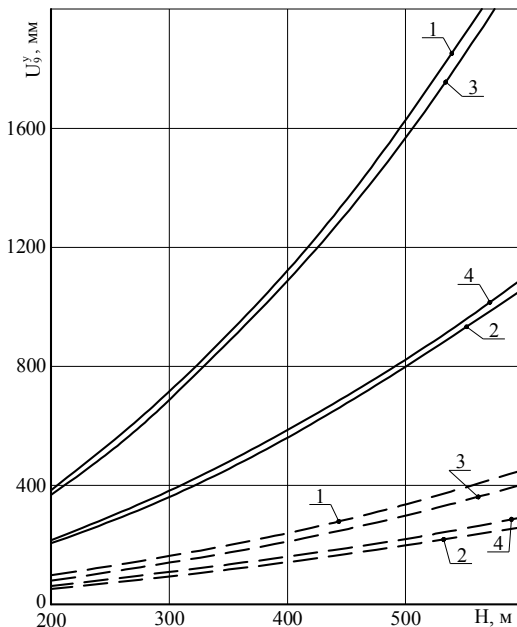


Рис. 11.4. Опускание U_9^y замка свода выработки с ростом глубины разработки H при: — $\sigma_{сж1}^K = 5$ МПа; - - - $\sigma_{сж1}^K = 20$ МПа;

- 1 - $\sigma_{сж2}^K = \sigma_{сж1}^П = 5$ МПа;
- 2 - $\sigma_{сж2}^K = \sigma_{сж1}^П = 20$ МПа;
- 3 - $\sigma_{сж2}^K = 5$ МПа, $\sigma_{сж1}^П = 20$ МПа;
- 4 - $\sigma_{сж2}^K = 20$ МПа, $\sigma_{сж1}^П = 5$ МПа

свода $U_9^y = 100 \dots 300$ мм.

Таким образом, по результатам анализа влияния на смещения замка свода прочностных и деформационных характеристик допредельного и предельного состояния близлежащих породных слоев можно сделать два вывода:

– параметры $\sigma_{сж1}^K$, $\sigma_{сж2}^K$, E_1^K и E_2^K необходимо учитывать при прогнозе перемещений свода U_9^y выработки;

– влияние механических характеристик $\sigma_{сж1}^{\Pi}$ и E_1^{Π} первого породного слоя почвы находятся в пределах погрешности, допускаемой при горнотехнических расчетах, что позволяет их исключить при прогнозировании величины U_9^y .

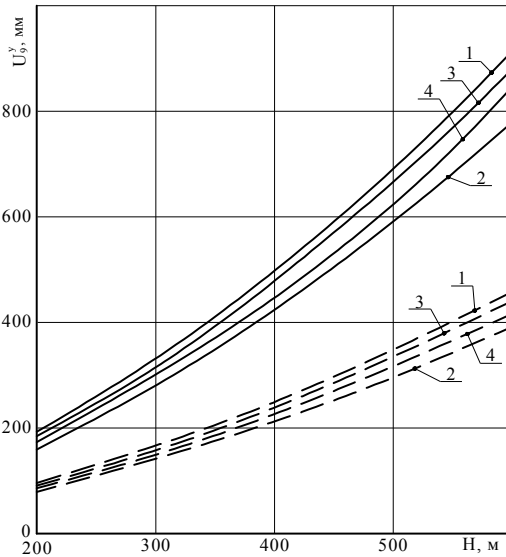


Рис. 11.5. Опускание U_9^y замка свода выработки с ростом глубины разработки H

при: — $(\sigma_{сж1}^K)^0 / \sigma_{сж1}^K = 0,1$;

--- $(\sigma_{сж1}^K)^0 / \sigma_{сж1}^K = 0,2$;

1 - $(\sigma_{сж2}^K)^0 / \sigma_{сж2}^K = (\sigma_{сж1}^{\Pi})^0 / \sigma_{сж1}^{\Pi} = 0,1$;

2 - $(\sigma_{сж2}^K)^0 / \sigma_{сж2}^K = (\sigma_{сж1}^{\Pi})^0 / \sigma_{сж1}^{\Pi} = 0,2$;

3 - $(\sigma_{сж2}^K)^0 / \sigma_{сж2}^K = 0,1$, $(\sigma_{сж1}^{\Pi})^0 / \sigma_{сж1}^{\Pi} = 0,2$;

4 - $(\sigma_{сж2}^K)^0 / \sigma_{сж2}^K = 0,2$, $(\sigma_{сж1}^{\Pi})^0 / \sigma_{сж1}^{\Pi} = 0,1$

массива (рис. 11.5). Вполне логично, что наибольшее влияние на величину U_9^y оказывает остаточная прочность первого породного слоя: связь U_9^y с

Анализ влияния на перемещение замка свода U_9^y механических характеристик запредельного состояния $\frac{(\sigma_{сжi}^{K,\Pi})^0}{\sigma_{сжi}^{K,\Pi}}$ и

$\frac{M_i^{K,\Pi}}{E_i^{K,\Pi}}$ близлежащих породных слоев дал следующие результаты.

Подтверждена общеизвестная закономерность снижения перемещения контура выработки при росте остаточной прочности вмещающего породного

параметром $\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}$ обратно пропорциональная и близка к степенной функ-

ции с показателем степени – 1, то есть при увеличении $\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}$ в два раза

происходит ограничение опускания замка свода также около двух раз. Как видим, остаточная прочность породы существенно влияет на геомеханические процессы в окрестности пластовой выработки. Те же тенденции характерны и

для параметров $\frac{(\sigma_{сж2}^K)^0}{\sigma_{сж2}^K}$ второго слоя кровли и $\frac{(\sigma_{сж1}^П)^0}{\sigma_{сж1}^П}$ первого слоя почвы

углевещающего массива, однако, степень их влияния на величину U_9^y существенно ниже: при увеличении указанных параметров от 0,1 до 0,2 снижение U_9^y происходит всего до 10,8% и 6,4% соответственно. Принимая во внимание,

что совместное влияние $\frac{(\sigma_{сж2}^K)^0}{\sigma_{сж2}^K}$ и $\frac{(\sigma_{сж1}^П)^0}{\sigma_{сж1}^П}$ оценивается до 18% це-

лесообразно в разрабатываемой методике прогноза учитывать колебания остаточной прочности второго породного слоя кровли при усредненном значении

$\frac{(\sigma_{сж1}^П)^0}{\sigma_{сж1}^П} = 0,15$ для первого породного слоя почвы. Тогда погрешность

определения U_9^y не будет превышать 3,5%.

Закономерности влияния модуля спада $M_i^{K,П}$ на величину смещения U_9^y замка свода также не противоречат известным аналитическим решениям [135, 169] и для пластовой выработки характеризуются следующими особенностями (рис. 11.6). Как и следовало ожидать, наибольшее влияние оказывает параметр $\frac{M_1^K}{E_1^K}$ первого породного слоя кровли (до 59% в диапазоне

$0,5 \leq \frac{M_1^K}{E_1^K} \leq 3$). Аналогичные параметры второго породного слоя кровли и

первого слоя почвы оказывают гораздо меньшее воздействие на смещение

U_9^y замка свода. Параметр $\frac{M_2^K}{E_2^K}$ изменяет U_9^y до 7% на глубине $H = 200$ м и

до 12,9% на глубине $H = 600$ м, но, если усреднить значение $\frac{M_2^K}{E_2^K} = 1,3$ (наи-

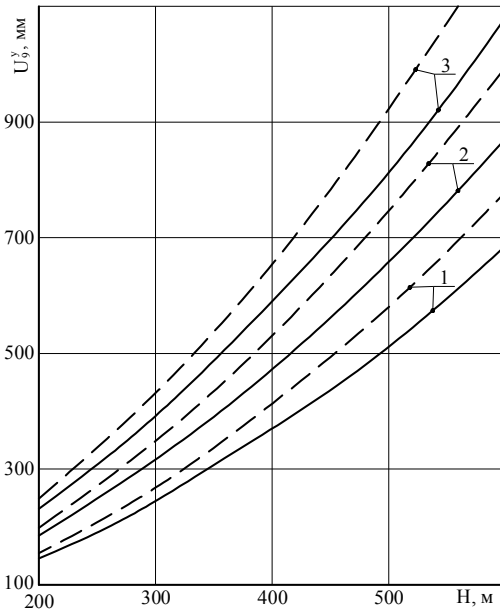


Рис. 11.6. Опускание U_9^y замка свода выработки с ростом глубины разработки H

при: — $\frac{M_2^K}{E_2^K} = 0,5$; --- $\frac{M_2^K}{E_2^K} = 3$;

1 - $\frac{M_1^K}{E_1^K} = 0,5$; 2 - $\frac{M_1^K}{E_1^K} = 1,3$; 3 - $\frac{M_1^K}{E_1^K} = 3$

более характерное для углевмещающих пород Западного Донбасса), то относительно него колебания U_9^y не превышают 6,6%, то есть вполне допустимы при горнотехнических расчетах.

Таким образом, установлено, что при прогнозе опускания замка свода необходимо учитывать следующие характеристики запредельного состояния близлежащих породных слоев углевмещающей толщи:

$$\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}, \frac{(\sigma_{сж2}^K)^0}{\sigma_{сж2}^K} \text{ и } \frac{M_1^K}{E_1^K}.$$

Не менее важным является определение вертикальных перемещений (U_4^y , U_5^y , U_{13}^y , и

U_{14}^y) в зоне прохода людей, повышенная величина которых обусловит невыполнение правил безопасности.

Прежде всего, следует отметить, что вертикальные перемещения U_5^y и U_{13}^y практически одинаковы во всем диапазоне исследований; перемещение U_4^y

больше U_{14}^y всего на 5,6...6,0%, что объясняется малым углом падения угольного пласта; величины U_4^y и U_{14}^y меньше соответствующих значений U_5^y и U_{13}^y на 8,7...16,1%, что указывает на тенденцию снижения вертикальных перемещений при движении от замка к пяте свода. Аналогичный факт отмечается и для других участков свода (точки 5, 6, 7, 8, 10, 11 и 12 на рис. 11.1) и подтверждает наблюдаемый в шахтных условиях процесс выполаживания

свода, что влечет за собой снижение несущей способности рамной крепи.

Нас больше интересуют смещения U_5^y и U_{13}^y , которые при опускании свода могут переместить точки 5 и 13 контура выработки в зону безопасного прохода людей (1,8 м от пешеходного настила), что недопустимо по действующим нормам правил безопасности. Развитие перемещений U_5^y и U_{13}^y с ростом глубины разработки аналогичны вышеописанным закономерностям U_9^y замка свода, но имеются некоторые особенности, которые пояснены на рис. 11.7 (графики приведены для глубины $H = 400$ м). При прочих равных условиях величина $U_{5,13}^y$ составляет 64...71% от U_9^y , что еще раз обращает внимание на процесс выполаживания свода выработки.

Влияние сопротивления сжатию $\sigma_{сж1}^K$ первого породного слоя усиливается (в сравнении с U_9^y) и в диапазоне $\sigma_{сж1}^K = 5...20$ МПа величина $U_{5,13}^y$ изменяется до 8,14 раза, поскольку координаты точек 5 и 13 располагаются в самом эпицентре опорного давления и возникающая здесь область запредельного состояния пород оказывает более интенсивное воздействие.

В противовес отмеченному выше, влияние сопротивления сжатию $\sigma_{сж2}^K$ второго породного слоя кровли уменьшается (по отношению к U_9^y), что обусловлено большей удаленностью от него точек 5 и 13: в диапазоне $\sigma_{сж2}^K = 5...20$ МПа перемещения $U_{5,13}^y$ изменяются всего до 52%.

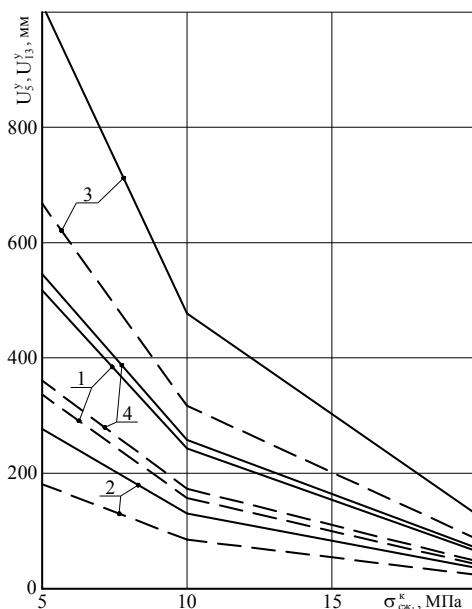


Рис. 11.7. Вертикальные перемещения U_5^y , U_{13}^y свода выработки в зоне прохода людей в зависимости от сопротивления сжатию $\sigma_{сж1}^K$ первого породного слоя кровли при:

— $\sigma_{сж2}^K = 5$ МПа; - - - $\sigma_{сж2}^K = 20$ МПа;

1 - $(\sigma_{сж1}^K)^0 / \sigma_{сж1}^K = 0,1$, $M_1^K / E_1^K = 0,5$;

2 - $(\sigma_{сж1}^K)^0 / \sigma_{сж1}^K = 0,2$, $M_1^K / E_1^K = 0,5$;

3 - $(\sigma_{сж1}^K)^0 / \sigma_{сж1}^K = 0,1$, $M_1^K / E_1^K = 3$;

4 - $(\sigma_{сж1}^K)^0 / \sigma_{сж1}^K = 0,2$, $M_1^K / E_1^K = 3$

По той же причине, что и $\sigma_{сж1}^K$ параметры предельного состояния $\left(\frac{\sigma_{сж1}^K}{\sigma_{сж1}^K}\right)^0$ и $\frac{M_1^K}{E_1^K}$ первого породного слоя кровли оказывают весьма существенное влияние на развитие перемещений $U_{3,13}^y$: в диапазоне $\frac{\left(\sigma_{сж1}^K\right)^0}{\sigma_{сж1}^K} = 0,1 \dots 0,2$ и $\frac{M_1^K}{E_1^K} = 0,5 \dots 3$ перемещения изменяются до 3,66 раз.

Остальные механические характеристики близлежащих породных слоев углевмещающей толщи (за исключением модуля деформации первого породного слоя) не оказывают сколь-нибудь существенного влияния на вертикальные перемещения свода выработки в зоне прохода людей.

Анализ тенденций опускания свода рамной крепи также позволяет наметить пути ее ресурсосберегающего усиления с помощью системы анкеров в определенных горно-геологических условиях [66-68, 170]. Предпосылкой этого пути являются две стороны единого геомеханического процесса:

- относительно умеренные перемещения свода (при H до 400 м и $\sigma_{сжi}^{K,II} = 10 \dots 15$ МПа; H до 600 м и $\sigma_{сжi}^{K,II} > 15$ МПа), которые можно ограничить системой анкеров и привести в соответствие с конструктивно-технологическими нормами и правилами безопасной эксплуатации выработки;
- относительно небольшие размеры зон предельного и предельного состояния приконтурных пород кровли, которые позволяют анкерам развивать требуемую реакцию сопротивления.

По причине невозможности полного исключения перемещений свода рамы необходимо применять податливые конструкции анкеров, например, трубчатые ТА2, которые также обладают высокой несущей способностью в режиме податливости.

Исходя из эпюр распределения σ в своде рамы анкера целесообразно устанавливать в областях действия концентраций σ : в замке свода выработки и его нижней части в районе расположения замков податливости рамной крепи.

11.3. ЗАКОНОМЕРНОСТИ СБЛИЖЕНИЯ БОКОВ ВЫРАБОТКИ

Выявление тенденций развития сближения (по горизонтальной координате X) боков выработки чрезвычайно важно по ряду причин:

- перемещения U_i^x боков выработки уменьшают ее проходное сечение для движения воздушной струи;

– чрезмерное сближение боков выработки нарушает безопасные расстояния при движении транспортных средств (зазоры между стойками рамной крепи и транспортными средствами, зазоры между ними в двухпутевых выработках);

– существует вероятность невыполнения правил безопасности по минимально допустимой ширине прохода людей;

– изгиб стоек рамной крепи (повсеместно наблюдаемый на шахтах Западного Донбасса) резко снижает ее несущую способность, что нередко приводит к потере устойчивости выработки в целом.

Наибольший интерес представляют горизонтальные перемещения U_4^x , U_5^x , U_{13}^x и U_{14}^x в зоне прохода людей и величин U_1^x и U_{17}^x сближения опор стоек рамы при их изгибе.

Независимо от механических характеристик близлежащих породных слоев углевмещающей толщи проявляются достаточно стабильные закономерности горизонтальных перемещений различных участков боков выработки:

– в зоне прохода людей перемещения со стороны падения пласта выше, чем со стороны восстания: $\frac{U_4^x}{U_{14}^x} = 1,04...1,16$; $\frac{U_5^x}{U_{15}^x} = 1,38...1,47$;

– разница между перемещениями U_5^x и U_4^x изменяется в весьма ограниченном интервале от $-4,2$ до $6,8\%$, что с достаточным основанием позволяет исследовать закономерности связи с геомеханическими параметрами системы только перемещений U_5^x ;

– перемещения опоры стойки со стороны восстания пласта превышают таковые со стороны падения $\frac{U_{17}^x}{U_1^x} = 1,20...1,60$, что обосновывает

рассмотрение закономерностей связи только величины U_{17}^x , как более опасной с точки зрения несоответствия правилам безопасности;

– попарное сравнение U_1^x , U_2^x и U_{16}^x , U_{17}^x показывает, что разница между ними может достигать $200...250$ мм всего на длине 450 мм прямолинейной части стойки рамы, то есть, происходит ее интенсивный изгиб с резким снижением несущей способности рамы.

Таким образом, на первоначальном этапе целесообразно провести детальный анализ закономерностей влияния геомеханических параметров системы на сближение боков выработки для ограниченного числа точек: U_4^x , U_5^x – зона прохода людей со стороны падения пласта; U_{17}^x – опора стойки рамной крепи со стороны восстания пласта.

На рис. 11.8 приведены зависимости развития горизонтальных перемещений $U_{4,5}^x$ в зоне прохода людей с

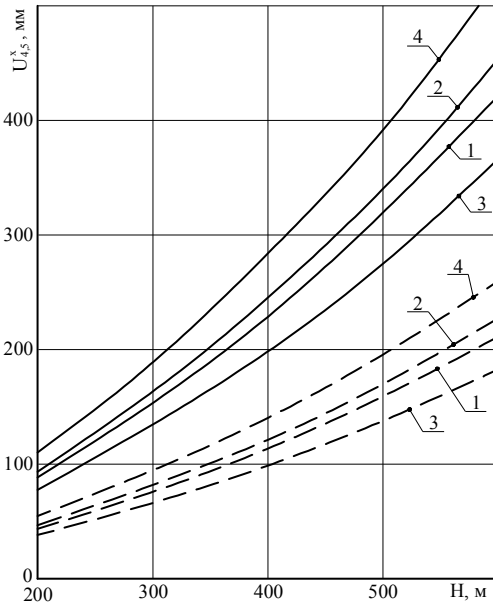


Рис. 11.8. Горизонтальные перемещения $U_{4,5}^x$,

U_5^x боков выработки в зоне прохода людей в зависимости от глубины разработки H

при: — $E_1^K = 0,3 \cdot 10^4$ МПа;

--- $E_1^K = 1 \cdot 10^4$ МПа;

1 - $E_2^K = E_1^H = 0,3 \cdot 10^4$ МПа;

2 - $E_2^K = E_1^H = 1 \cdot 10^4$ МПа;

3 - $E_2^K = 0,3 \cdot 10^4$ МПа, $E_1^H = 1 \cdot 10^4$ МПа;

4 - $E_2^K = 1 \cdot 10^4$ МПа, $E_1^H = 0,3 \cdot 10^4$ МПа

ростом глубины разработки. На графиках четко прослеживается разная степень влияния на величину $U_{4,5}^x$ модулей деформации E_1^K , E_2^K и E_1^H близлежащих породных слоев углевещающей толщи: в исследуемом диапазоне ($E_i^{K,H} = (0,3...1) \cdot 10^4$ МПа) перемещение изменяется до 2,01 раза – (E_1^K), до 23,9% – (E_2^K) и до 15,2% – (E_1^H); совместное их воздействие достигает до 2,86 раз.

В отличие от вертикальных перемещений свода выработки зависимость $U_{4,5}^x$ имеет ряд особенностей:

– горизонтальные перемещения $U_{4,5}^x$ составляют 37,5...47,6%

от смещений замка свода U_9^y и превышают нормативный [156, 157, 164] показатель на – 35%;

– рост модуля деформации E_2^K второго породного слоя кровли не ограничивает перемещения $U_{4,5}^x$ (как это наблюдается для U_9^y), а напротив, интенсифицирует их; это явление объясняется тем, что под воздействием горного давления более жесткий второй слой кровли действует как штамп в боках выработки (зона опорного давления), выдавливая породу в полость выработки;

– заметное влияние начинает оказывать модуль деформации E_1^H первого породного слоя почвы, с ростом которого перемещения $U_{4,5}^x$ снижаются;

это обусловлено тем, что более жесткая почва создает некое подобие опоры для ограничения развития зон запредельного состояния в боках выработки, где увеличивающаяся в объеме разрыхленная порода стремится переместиться в полость выработки.

Прочностные характеристики близлежащих породных слоев ($\sigma_{сж1}^K$, $\sigma_{сж2}^K$ и $\sigma_{сж1}^П$) оказывают еще большее воздействие на развитие горизонтальных перемещений $U_{4,5}^x$ в зоне прохода людей (рис. 11.9).

Наиболее зависима (до 6,08 раз в диапазоне $\sigma_{сж1}^K = 5...20$ МПа)

величина перемещений $U_{4,5}^x$ от сопротивления сжатию пород первого слоя кровли $\sigma_{сж1}^K$, в котором и размещены бока выработки. Это объясняется высокой подвижностью разупрочненных пород, которые, перемещаясь под воздействием опорного давления в боках выработки, создают высокую боковую нагрузку на стойки рамной крепи. Если первый породный слой почвы более устойчив, то он ограничивает развитие перемещений не только в почве, но и боках выработки за счет снижения размеров областей запредельного состояния в зоне опорного давления.

В диапазоне $\sigma_{сж}^П = 5...20$ МПа влияние первого породного слоя почвы сказывается до 41,3%. В то же время, второй породный слой кровли оказывает противоположное влияние (по аналогии с E_2^K): с увеличением степени его целостности (рост $\sigma_{сж2}^K$) возрастает эффект действия штампа на разупрочненный первый породный слой кровли и под воздействием опорного давления боковые перемещения $U_{4,5}^x$ в зоне прохода людей возрастают до 32,3%.

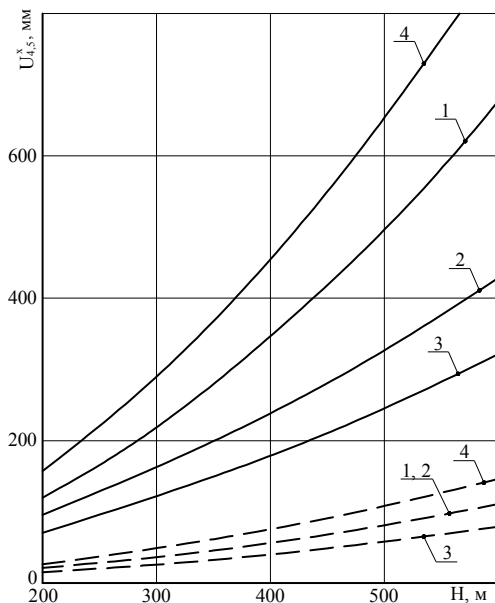


Рис. 11.9. Горизонтальные перемещения $U_{4,5}^x$ боков выработки в зоне прохода людей в зависимости от глубины разработки H при:

— $\sigma_{сж1}^K = 5$ МПа; --- $\sigma_{сж1}^K = 20$ МПа;

1 - $\sigma_{сж2}^K = \sigma_{сж1}^П = 5$ МПа;

2 - $\sigma_{сж2}^K = \sigma_{сж1}^П = 20$ МПа;

3 - $\sigma_{сж2}^K = 5$ МПа, $\sigma_{сж1}^П = 20$ МПа;

4 - $\sigma_{сж2}^K = 20$ МПа, $\sigma_{сж1}^П = 5$ МПа

Механические характеристики запредельного состояния влияют на развитие горизонтальных перемещений $U_{4,5}^x$ в зоне прохода людей с разной интенсивностью для каждого из близлежащих породных слоев углевмещающей толщи. В диапазоне

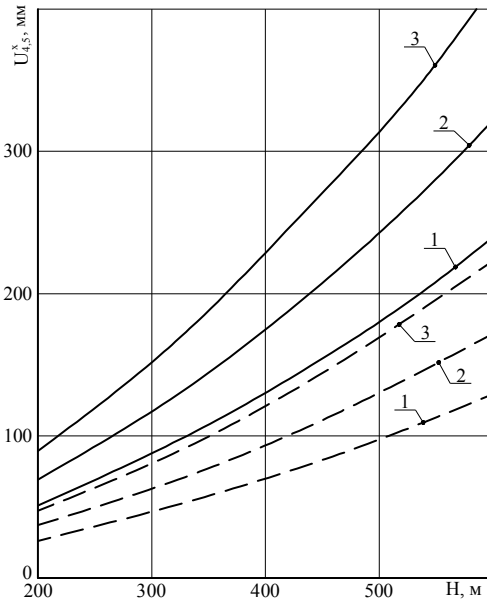


Рис. 11.10. Горизонтальные перемещения $U_{4,5}^x$ боков выработки в зоне прохода людей в зависимости от глубины разработки H

при: — $\left(\frac{\sigma_{сж1}^K}{\sigma_{сж1}^K}\right)^0 / \sigma_{сж1}^K = 0,1$;

--- $\left(\frac{\sigma_{сж1}^K}{\sigma_{сж1}^K}\right)^0 / \sigma_{сж1}^K = 0,2$;

1 — $M_1^K / E_1^K = 0,5$; 2 — $M_1^K / E_1^K = 1,3$;

3 — $M_1^K / E_1^K = 3$

толщи: $\sigma_{сж1}^K$, $\sigma_{сж2}^K$, $\sigma_{сж1}^П$, E_1^K , E_2^K , $E_1^П$, $\left(\frac{\sigma_{сж1}^K}{\sigma_{сж1}^K}\right)^0$ и $\frac{M_1^K}{E_1^K}$. Указанные харак-

теристики необходимо учитывать при прогнозе боковых перемещений в зоне прохода людей.

Не менее важным участком (с точки зрения безопасного прохода людей, движения транспортных средств и, особенно, устойчивости рамной крепи)

$$\left(\frac{\sigma_{сж1}^{K,П}}{\sigma_{сж1}^{K,П}}\right)^0 = 0,1...0,2 \text{ и } \frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}} = 0,5...3$$

эти характеристики второго слоя кровли и первого слоя почвы изменяют величину $U_{4,5}^x$ всего до 8,5% и их колебания можно не учитывать при прогнозе перемещений $U_{4,5}^x$. В то же время, характеристики запредельного состояния первого породного слоя кровли оказывают существенное влияние на изменение $U_{4,5}^x$:

$$\left(\frac{\sigma_{сж1}^K}{\sigma_{сж1}^K}\right)^0 - \text{до } 53,6\%, \quad \frac{M_1^K}{E_1^K} - \text{до}$$

74,2% (рис. 11.10), что объясняется примыканием именно первого породного слоя кровли к зоне прохода людей.

Таким образом, установлено, что решающее воздействие на развитие боковых перемещений $U_{4,5}^x$ в зоне прохода людей оказывают такие механические характеристики близлежащих породных слоев углевмещающей

является район опоры стоек рамы, величина сближения которых может до 60% превышать горизонтальные перемещения на других более удаленных от почвы выработки участках. Здесь выявлено три общие закономерности:

– несмотря на небольшой угол падения пласта (до 6°) более активный процесс сдвижения опор стоек наблюдается со стороны восстания пласта, в связи с чем более подробному описанию подвергнуто перемещение U_{17}^x ;

– повсеместно наблюдается «эффект штампа», когда более жесткие и целостные (в тех вариантах расчета НДС системы, где это имеет место) первый породный слой кровли и угольный пласт под воздействием опорного давления интенсифицируют боковое перемещение почвы пласта, где и расположены опоры стоек рамы;

– из-за удаленности опор стоек рамы от второго породного слоя кровли, его механические характеристики не оказывают существенного влияния на горизонтальные перемещения опор стоек рамной крепи.

Закономерность связи перемещения U_{17}^x с модулями деформации первых породных слоев кровли E_1^K и почвы E_1^H (с увеличением глубины разработки) приведена на рис. 11.11. Поскольку опоры стоек рамы расположены в почве пласта, то более сильное влияние оказывает E_1^H – до 2,01 раз в исследуемом интервале $(0,3...1) \cdot 10^4$ МПа изменения этого параметра. А вот параметр E_1^K наглядно иллюстрирует «эффект штампа», когда более жесткий первый породный слой кровли ($E_1^K = 1 \cdot 10^4$ МПа) увеличивает горизонтальное перемещение E_1^K до 23,4%.

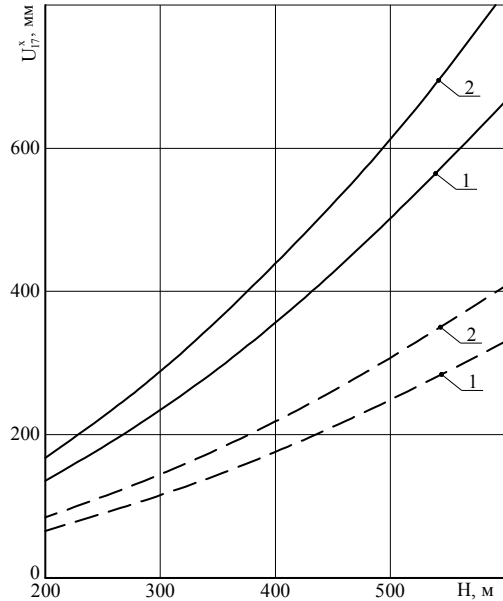


Рис. 11.11. Горизонтальные перемещения U_{17}^x в опоре стойки рамы в зависимости от

глубины разработки H при:

— $E_1^H = 0,3 \cdot 10^4$ МПа;

- - - $E_1^H = 1 \cdot 10^4$ МПа;

1 – $E_1^K = 0,3 \cdot 10^4$ МПа; 2 – $E_1^K = 1 \cdot 10^4$ МПа

Влияние прочностных характеристик $\sigma_{сж1}^K$ и $\sigma_{сж1}^П$ первых породных слоев кровли и почвы на перемещение U_{17}^x в определенной степени аналогично

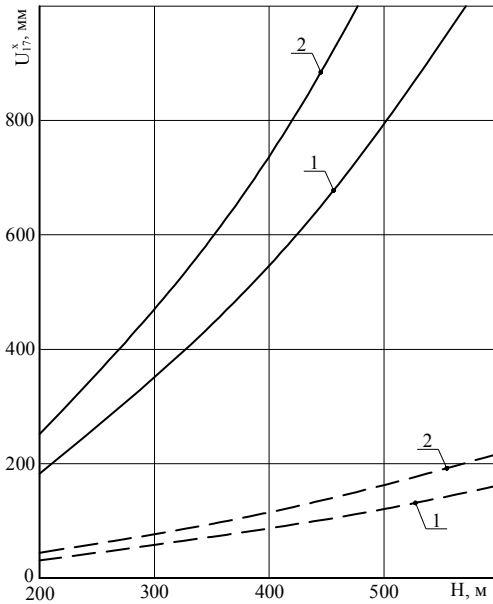


Рис. 11.12. Горизонтальные перемещения U_{17}^x в опоре стойки рамы в зависимости от глубины разработки H при:
 — $\sigma_{сж1}^П = 5$ МПа; - - - $\sigma_{сж1}^П = 20$ МПа;
 1 — $\sigma_{сж1}^K = 5$ МПа; 2 — $\sigma_{сж1}^K = 20$ МПа

воздействию модулей деформации этих слоев: увеличение $\sigma_{сж1}^П$ сдерживает, а рост $\sigma_{сж1}^K$ интенсифицирует развитие перемещений U_{17}^x (рис. 11.12). Безусловно, наиболее значимое влияние (до 6,73 раз в диапазоне $\sigma_{сж1}^{K,П} - 5...20$ МПа) оказывает сопротивление сжатию первого породного слоя почвы, поскольку опоры стоек рамы располагаются именно в этом слое. В указанном диапазоне $\sigma_{сж1}^K$ увеличивает перемещение U_{17}^x до 84% в зависимости от соотношения $\frac{\sigma_{сж1}^K}{\sigma_{сж1}^П}$. Установленный

факт объясняется тем, что чем прочнее вышележащий первый породный слой кровли, тем меньше в нем области запредельного состояния, которые определенным образом увеличивают его деформируемость

(снижается жесткость) и уменьшается «эффект штампа» по выдавливанию пород почвы в полость выработки в районе опоры стоек рамной крепи. Установленный «эффект штампа» подтверждается при анализе связи пере-

мещений U_{17}^x с характеристиками $\frac{(\sigma_{сж1}^{K,П})^0}{\sigma_{сж1}^{K,П}}$ и $\frac{M_1^{K,П}}{E_1^{K,П}}$ запредельного состоя-

ния первых породных слоев кровли и почвы (рис. 11.13). Из графиков видно,

что с уменьшением $\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}$ и увеличением $\frac{M_1^K}{E_1^K}$ величина перемещения

U_{17}^x снижается. В то же время известно [135, 169], что такое изменение характеристик способствует развитию размеров зон запредельного состояния (в данном случае в первом породном слое кровли). Также известна повышенная деформируемость породы в запредельном состоянии, которая демпфирует передачу нагрузки (в зоне опорного давления) на первый породный слой почвы и перемещение U_{17}^x уменьшается.

Параметры запредельного состояния $\left(\frac{\sigma_{сж1}^K}{\sigma_{сж1}^K}\right)^0$ и $\frac{M_1^K}{E_1^K}$ первого породного слоя кровли изменяют U_{17}^x до 7,4 и 18,0% соответственно, а их совместное действие оценивается до 26,7%. Ввиду небольшого влияния остаточной прочности первого породного слоя кровли ($(\sigma_{сж1}^K)^0 < 10\%$) следует

усреднить ее значение для углевмещающих пород Донбасса и при выводе уравнения регрессии учитывать поправочным коэффициентом.

Характеристики запредельного состояния первого породного слоя почвы оказывают более значимое влияние на горизонтальные перемещения U_{17}^x :

$U_{17}^x : \left(\frac{\sigma_{сж1}^П}{\sigma_{сж1}^П}\right)^0$ – до 62,5%,

а $\frac{M_1^П}{E_1^П}$ – до 62,2% в исследуемом диапазоне их изменения.

По итогам проведенного анализа установлено, что при прогнозировании сближения опор стоек рамной крепи следует учитывать следующие механи-

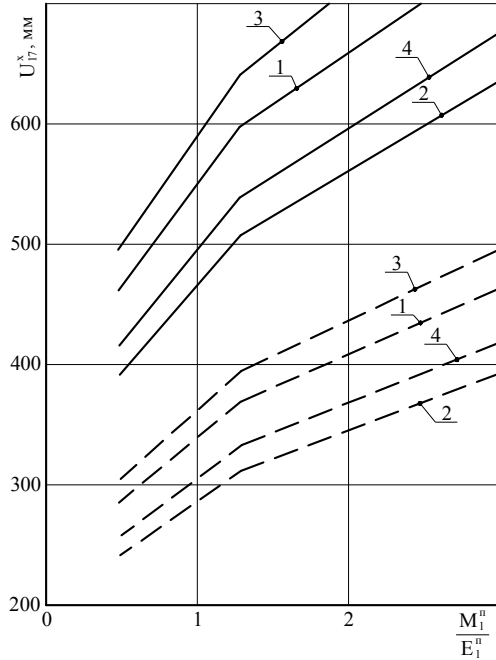


Рис. 11.13. Горизонтальные перемещения U_{17}^x в опоре стойки рамы в зависимости от параметра $M_1^П / E_1^П$ первого породного

слоя почвы при: — $\left(\frac{\sigma_{сж1}^П}{\sigma_{сж1}^П}\right)^0 / \sigma_{сж1}^П = 0,1$;

--- $\left(\frac{\sigma_{сж1}^П}{\sigma_{сж1}^П}\right)^0 / \sigma_{сж1}^П = 0,2$;

1 – $\left(\frac{\sigma_{сж1}^К}{\sigma_{сж1}^К}\right)^0 / \sigma_{сж1}^К = 0,1, M_1^K / E_1^K = 0,5$;

2 – $\left(\frac{\sigma_{сж1}^К}{\sigma_{сж1}^К}\right)^0 / \sigma_{сж1}^К = 0,1, M_1^K / E_1^K = 3$;

3 – $\left(\frac{\sigma_{сж1}^К}{\sigma_{сж1}^К}\right)^0 / \sigma_{сж1}^К = 0,2, M_1^K / E_1^K = 0,5$;

4 – $\left(\frac{\sigma_{сж1}^К}{\sigma_{сж1}^К}\right)^0 / \sigma_{сж1}^К = 0,2, M_1^K / E_1^K = 3$

ческие характеристики первых породных слоев кровли и почвы: $\sigma_{сж1}^K$, $\sigma_{сж1}^П$,

$$E_1^K, E_1^П, \frac{(\sigma_{сж1}^П)^0}{\sigma_{сж1}^П}, \frac{M_1^K}{E_1^K} \text{ и } \frac{M_1^П}{E_1^П}.$$

Рекомендации по повышению устойчивости боков рамной крепи путем ограничения их сближения при установке анкеров аналогичны таковым для свода рамы. Здесь также в оговоренном диапазоне изменения геомеханических параметров целесообразно применять податливые конструкции анкеров с высокой несущей способностью в разупрочненном породном массиве.

Наиболее эффективные координаты установки анкеров – опора стойки рамы и конец ее прямолинейной части в районе пяты свода.

Эти рекомендации отчасти схожи с работами [166, 170], но, в отличие от них, геомеханически обоснованы для слоистого неоднородного углевмещающего массива с нарушенными связями между породными слоями.

11.4. ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕГО МАССИВА НА ПУЧЕНИЕ ПОЧВЫ ВЫРАБОТКИ

Исследование закономерностей развития перемещений пород почвы в полость выработки (пучение почвы) выявило ряд общих тенденций этого процесса для различных сочетаний геомеханических параметров системы «массив-крепь»:

– даже при малом угле падения угольного пласта (до 6°) наблюдается некоторая асимметрия эпюры пучения почвы по ширине выработки: ее максимум смещен на 0,2...0,3 м в сторону восстания пласта, что указывает на повышенную интенсивность пучения в этой области. Однако величина поднятия почвы по вертикальной оси выработки U_{20}^y (точка 20 на рис. 11.1) незначительно (до 1,2%) отличается от максимального значения и позволяет использовать этот параметр как характеристику оценки максимальной интенсивности пучения;

– четко прослеживается вдавливание опор стоек рамы в породы почвы (несмотря на моделирование подпятников под каждой из опор размером 200 x 200 x 20 мм) под воздействием вертикальной нагрузки на крепь. Здесь следует отметить, что в существующих нормативных методиках [156, 157, 164] нет разделения величины перемещения пород почвы относительно опоры стойки рамы на две составляющие: собственно пучение и вдавливание стойки в почву. Такая интегральная оценка пучения не отражает физическую сущность двух довольно различающихся между собой геомеханических процессов и в ряде случаев может привести к существенным погрешностям в прогнозировании пучения почвы пластовой выработки, пройденной в

слоистом массиве слабых пород;

– величины вдавливания обеих опор стоек U_1^y и U_{17}^y до глубин разработ-
ки $H = 400...450$ м примерно одинаковы. При дальнейшем увеличении H
происходит более интенсивный изгиб стойки со стороны восстания пласта,
за счет чего компенсируется

дальнейшее перемещение U_{17}^y ,
а в некоторых вариантах даже
несколько снижается. Со сторо-
ны падения пласта изгиб стойки
рамы менее интенсивный и при
увеличении H перемещение
 U_1^y растет, достигая величины
до 0,3...0,5 м. Таким образом,
суммарная величина перемеще-
ний почвы (по оси выработки) от-
носительно опоры стойки соста-
вит $U_1^y + U_{20}^y$, по которой и необ-
ходимо оценивать выполнение
требований правил безопасности
и эксплуатационные параметры
выработки;

– установлено, что поднятие
почвы в зоне прохода людей U_{18}^y
и U_{22}^y имеют аналогичные пара-

метру U_{20}^y закономерности связи
не только в качественном, но и в
количественном плане. Вне за-
висимости от геомеханических
параметров системы соотноше-
ния указанных перемещений

практически стабильны и составляют: $\frac{U_{22}^y}{U_{20}^y} = 0,54...0,57$; $\frac{U_{18}^y}{U_{20}^y} = 0,66...0,67$. По-

этому представляется целесообразным установить уравнение регрессии
для перемещения U_{20}^y , а для величин U_{22}^y и U_{18}^y ввести поправочные коэф-
фициенты 0,57 и 0,67 соответственно.

В первую очередь проанализированы закономерности развития макси-
мума пучения почвы U_{20}^y , наблюдаемого в районе оси выработки.

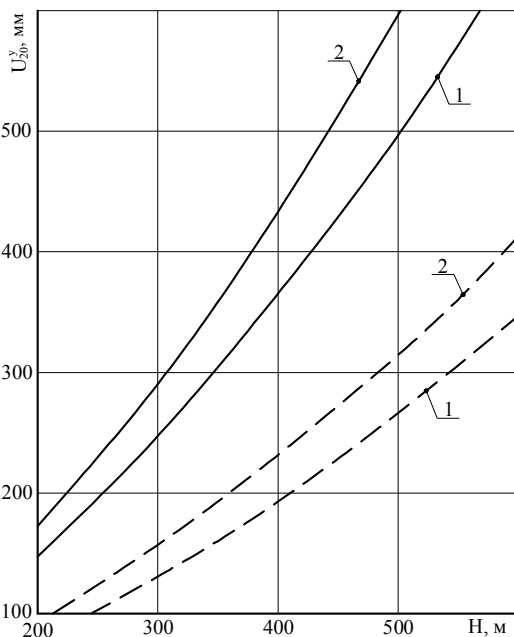


Рис. 11.14. Поднятие почвы по оси выработки
 U_{20}^y в зависимости от глубины разработки

H при: — $E_1^{II} = 0,3 \cdot 10^4$ МПа;

--- $E_1^{II} = 1 \cdot 10^4$ МПа;

1 — $E_1^K = 0,3 \cdot 10^4$ МПа; 2 — $E_1^K = 1 \cdot 10^4$ МПа

С увеличением глубины разработки наблюдается нелинейный рост поднятия почвы U_{20}^y (как и для других участков контура выработки). Модуль деформации первого породного слоя почвы угольного пласта оказывает влияние до 88,1% в диапазоне $E_1^K = (0,3...1) \cdot 10^4$ МПа (рис. 11.14). Влияние E_1^K оценивается до 19,2% и проявляется таким

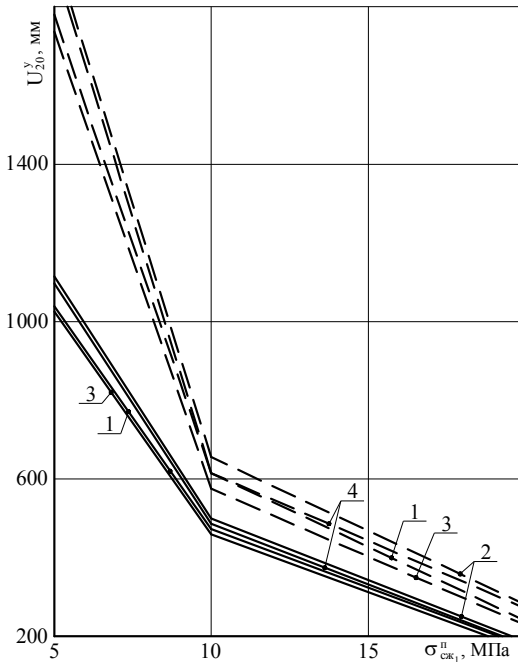


Рис. 11.15. Поднятие почвы по оси выработки U_{20}^y в зависимости от глубины разработки

H при: — $\sigma_{сж1}^K = 5$ МПа;

- - - $\sigma_{сж1}^K = 20$ МПа;

1 - $\left(\frac{\sigma_{сж1}^K}{\sigma_{сж1}^K}\right)^0 / \sigma_{сж1}^K = 0,1, M_1^K / E_1^K = 0,5$;

2 - $\left(\frac{\sigma_{сж1}^K}{\sigma_{сж1}^K}\right)^0 / \sigma_{сж1}^K = 0,1, M_1^K / E_1^K = 3$;

3 - $\left(\frac{\sigma_{сж1}^K}{\sigma_{сж1}^K}\right)^0 / \sigma_{сж1}^K = 0,2, M_1^K / E_1^K = 0,5$;

4 - $\left(\frac{\sigma_{сж1}^K}{\sigma_{сж1}^K}\right)^0 / \sigma_{сж1}^K = 0,2, M_1^K / E_1^K = 3$

образом, что с ростом E_1^K пучение почвы увеличивается, то есть присутствует «эффект штампа», когда жесткий первый породный слой кровли под воздействием опорного давления интенсифицирует перемещение пород почвы в полость выработки.

Аналогичным образом влияет на развитие пучения почвы сопротивление сжатию $\sigma_{сж1}^K$ первого породного слоя кровли, от величины которого зависит степень его целостности и размеры зон запредельного состояния с повышенной деформируемостью породы (рис. 11.15). С увеличением $\sigma_{сж1}^K$ происходит более интенсивное выдавливание пород почвы в полость выработки и его влияние оценивается до 72,9% на глубине $H = 600$ м. Размеры зон запредельного состояния в первом породном слое кровли также зависят от пара-

метров $\left(\frac{\sigma_{сж1}^K}{\sigma_{сж1}^K}\right)^0$ и $\frac{M_1^K}{E_1^K}$, которые,

снижая (повышая) деформационные свойства этого слоя в целом, изменяют действие «эффекта штампа». Однако влияние параметров запредельного со-

стояния первого слоя кровли гораздо меньше и, как правило, не выходит за

пределы 10%. Исключение составляют варианты с $\sigma_{сж1}^{K,II} = 20$ МПа, когда

влияние $\frac{M_1^K}{E_1^K}$ доходит до 17,5% и варианты с $\sigma_{сж1}^{II} = 5$ МПа, $\sigma_{сж1}^K = 20$ МПа,

когда влияние $\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}$ достигает

10,5%. С другой стороны, если усреднить анализируемые параметры, то колебания U_{20}^y в исследуемом диапазоне

$(\frac{\sigma_{сж1}^K}{\sigma_{сж1}^K})^0 = 0,1...0,2$; $\frac{M_1^K}{E_1^K} = 0,5...3$ не

выйдут за пределы допустимой погрешности (10%), что существенно упростит дальнейший вывод уравнения регрессии для расчета поднятия почвы U_{20}^y выработки в районе ее оси.

Наиболее сильное влияние на перемещение U_{20}^y оказывает сопротивление сжатию первого породного слоя почвы (до 8,1 раз), поскольку именно от этого параметра весьма зависят размеры областей запредельного состояния пород в почве, которые, обладая значительной подвижностью под воздействием опорного давления,

выдавливаются в полость выработки. Помимо $\sigma_{сж1}^{II}$, размеры областей за-

предельного состояния определяются (рис. 11.16) параметрами $\frac{(\sigma_{сж1}^{II})^0}{\sigma_{сж1}^{II}}$

(влияние до 2,14 раз) и $\frac{M_1^{II}}{E_1^{II}}$ (влияние до 87,2%), изменение которых обязательно к учету при прогнозе пучения почвы выработки.

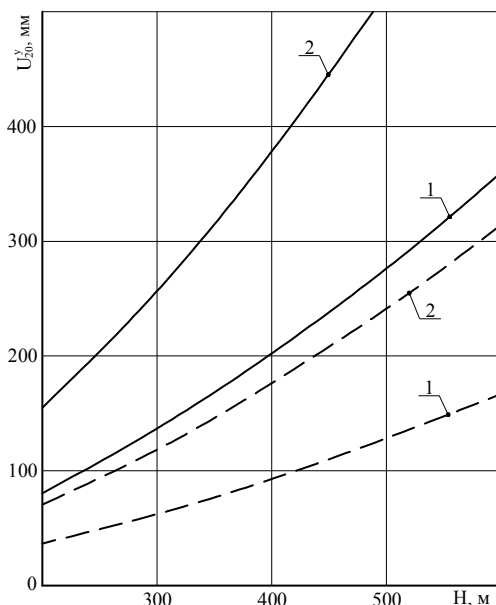


Рис. 11.16. Поднятие почвы по оси выработки U_{20}^y в зависимости от глубины разработки

H при: — $(\sigma_{сж1}^{II})^0 / \sigma_{сж1}^{II} = 0,1$;

--- $(\sigma_{сж1}^{II})^0 / \sigma_{сж1}^{II} = 0,2$;

1 — $M_1^{II} / E_1^{II} = 0,5$; 2 — $M_1^{II} / E_1^{II} = 3$

Закономерности развития пучения почвы в зоне прохода людей аналогичны таковым для U_{20}^y и определяются путем умножения на коэффициент 0,57 со стороны падения пласта и 0,67 – со стороны восстания.

Другой составляющей поднятия почвы выработки является глубина

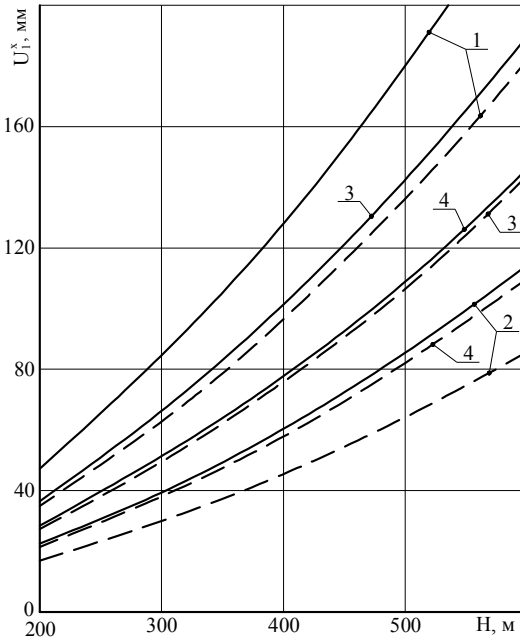


Рис. 11.17. Вдавливание опоры стойки U_1^y рамной крепи в зависимости от глубины разработки H при:

— $E_1^{\text{II}} = 0,3 \cdot 10^4$ МПа; - - - $E_1^{\text{II}} = 1 \cdot 10^4$ МПа;

1 – $\sigma_{сж1,2}^K = 5$ МПа; 2 – $\sigma_{сж1,2}^K = 20$ МПа;

3 – $\sigma_{сж1}^K = 5$ МПа, $\sigma_{сж2}^K = 20$ МПа;

4 – $\sigma_{сж1}^K = 20$ МПа, $\sigma_{сж2}^K = 5$ МПа

вдавливания $U_{1,17}^y$ опор стоек в почву под воздействием вертикальной нагрузки на крепь.

Глубина вдавливания $U_{1,17}^y$

определяется (помимо глубины разработки) двумя факторами

(рис. 11.17 и рис. 11.18): вертикальной нагрузкой на крепь и

состоянием (степенью разупрочнения) пород почвы под

опорами стоек рамы. Установлено, что существенно влияющими

механическими характеристиками первого фактора

являются $\sigma_{сж2}^K$ (до 27,2%) и

$\sigma_{сж1}^K$ (до 66,5%). Вторым фактор

включает механические характеристики первого пород-

ного слоя почвы: E_1^{II} – до

32,3%, $\sigma_{сж1}^{\text{II}}$ – до 8,41 раз,

$\left(\frac{\sigma_{сж1}^{\text{II}}}{\sigma_{сж1}^{\text{I}}}\right)^0$ – до 46,4%.

В части рекомендаций по

борьбе с пучением почвы мож-

но отметить следующее. В

предыдущих разделах проил-

люстрирована достаточно обширная область разупрочненных пород в почве

при определенных сочетаниях геомеханических параметров. Однако ограни-

чить пучение можно податливыми анкерами, которые за счет разницы пере-

мещений почвы на наружном и заглубленном конце анкера натягиваются

(без разрыва несущего элемента) и формируют сжимающими усилиями не-

которое подобие грузонесущей металлопородной конструкции в почве.

Смещаясь вместе с породами почвы (на заглубленном конце) податливые

люстрирована достаточно обширная область разупрочненных пород в почве при определенных сочетаниях геомеханических параметров. Однако ограничить пучение можно податливыми анкерами, которые за счет разницы перемещений почвы на наружном и заглубленном конце анкера натягиваются (без разрыва несущего элемента) и формируют сжимающими усилиями некоторое подобие грузонесущей металлопородной конструкции в почве. Смещаясь вместе с породами почвы (на заглубленном конце) податливые

анкера компенсируют разницу перемещений почвы по длине анкера.

Таким образом, на наш взгляд, при умеренной величине пучения почвы (в оговоренном ранее диапазоне изменения геомеханических параметров) целесообразно применение податливых анкеров с высокой реакцией сопротивления (повышенные сжимающие усилия, формирующие в породах почвы грузонесущую конструкцию). Этим требованиям в наибольшей степени отвечают конструкции трубчатых анкеров, особенно ТА-2, специально предназначенные для упрочнения слабых пород [171, 172].

11.5. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ КОНТУРА ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ

Наряду с установленными закономерностями развития смещений на наиболее ответственных (с точки зрения безопасности функционирования и устойчивости выработки) участках контура выработки не менее важным фактором является определение тенденции его изменения, и как следствие, уменьшения поперечного сечения в процессе сдвижения углевещающего массива, что ухудшает эффективность проветривания соответствующего участка шахтного поля. Поэтому были проанализированы закономерности изменения контура пластовой выра-

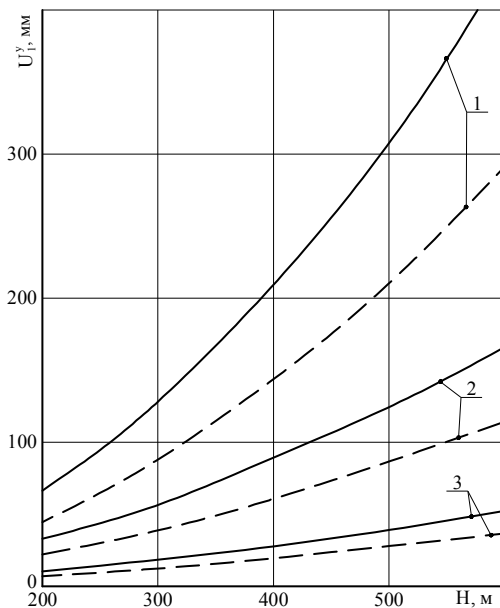


Рис. 11.18. Вдавливание опоры стойки U_1^y рамной крепи в зависимости от глубины разработки H при:

$$\text{—} \quad \left(\sigma_{сж1}^{II} \right)^0 / \sigma_{сж1}^{II} = 0,1 ;$$

$$\text{- - -} \quad \left(\sigma_{сж1}^{II} \right)^0 / \sigma_{сж1}^{II} = 0,2 ;$$

$$1 - \sigma_{сж1}^{II} = 5 \text{ МПа}; 2 - \sigma_{сж1}^{II} = 10 \text{ МПа};$$

$$3 - \sigma_{сж1}^{II} = 20 \text{ МПа}$$

ботки и ее относительного сечения $\frac{S}{S_0}$ (см. рис. 11.2) в зависимости от геомеханических параметров системы «массив-крепь».

На рис. 11.19 приведены эпюры изменения контура выработки с ростом глубины разработки при $\sigma_{сж1}^{K,II} = 10 \text{ МПа}$. На эпюрах четко прослеживается ряд особенностей, характерных для различных вариантов сочетаний геомеханических параметров:

- выполаживание свода (уменьшение стрелы подъема) рамы, что снижает ее несущую способность;
- изгиб стоек рамной крепи, который также способствует уменьшению ее несущей способности;
- с ростом глубины разработки становится более заметна асимметрия эпюры контура в кровле и почве выработки, направленная в сторону восстания пласта;
- изгиб стоек рамы происходит более интенсивно со стороны восстания пласта и по этой причине глубина внедрения стойки в почву выше со стороны падения пласта.

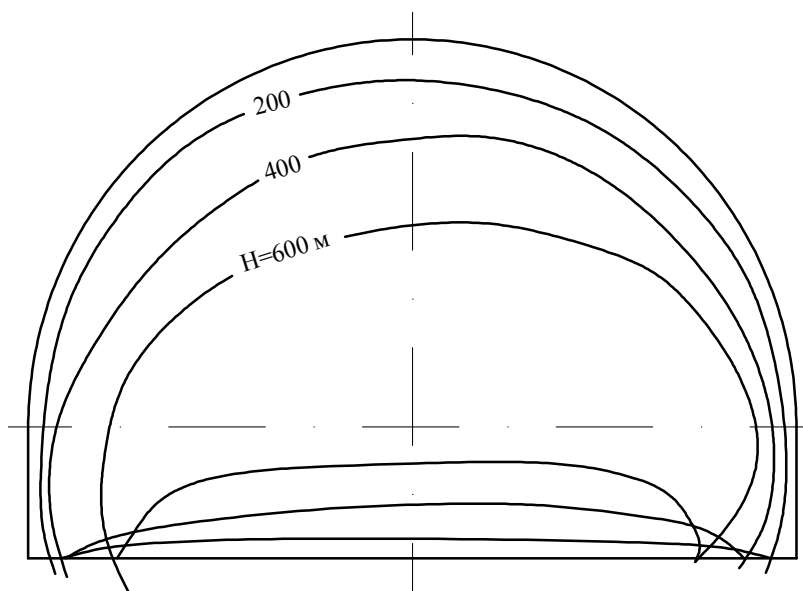


Рис. 11.19. Изменение контура выработки в зависимости от глубины H ее расположения

С увеличением глубины расположения выработки уменьшается площадь ее поперечного сечения; потеря сечения $\frac{S_0 - S}{S_0}$ составляет 13,7% при $H = 200$ м, 33,4% при $H = 400$ м и 61,4% при $H = 600$ м. Как видно из приведенных данных, уже на глубине 400 м сечение выработки уменьшилась на треть и для ее дальнейшей эксплуатации необходимо проводить ремонтно-восстановительные работы: подрывка почвы, выпуск породы в кровле и тому подобное.

Не менее существенно на увеличение потери сечения влияют прочност-

ные характеристики близлежащих породных слоев углевещающей толщи. На примере глубины $H = 500$ м (рис. 11.20) показано, что при расчетном сопротивлении сжатию $\sigma_{сж_i}^{К,П} = 20$ МПа близлежащих породных слоев потеря сечения составляет всего 16,1% и выработка находится в удовлетворительном состоянии с точки зрения ее устойчивости и безопасной эксплуатации. При $\sigma_{сж_i}^{К,П} = 10$ МПа потеря сечения составляет 32,1%, что требует проведения комплекса ремонтно-восстановительных работ. При $\sigma_{сж_i}^{К,П} = 5$ МПа потеря сечения возрастает до 81,8% и здесь, скорее всего, решается вопрос о полном перекреплении или проведении новой выработки. В этом плане следует отметить, что на глубине $H = 600$ м порода заполняет весь объем выработки.

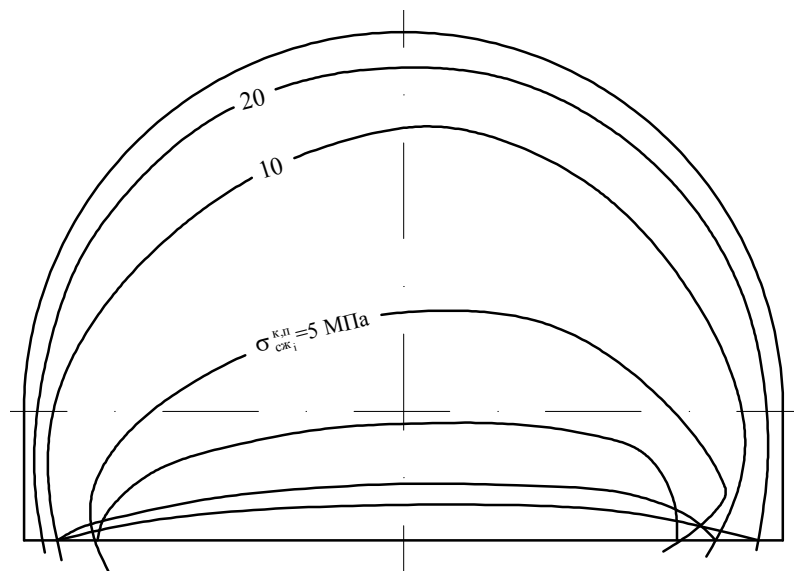


Рис. 11.20. Изменение контура выработки в зависимости от расчетного сопротивления сжатию $\sigma_{сж_i}^{К,П}$ близлежащих породных слоев

Приведенные данные указывают о чрезвычайной важности определения изменения площади поперечного сечения штрека для оценки его эксплуатационной пригодности. На величину уменьшения сечения штрека $\frac{S_0 - S}{S_0}$ оказывают влияние перемещения всех участков контура выработки, что ставит

параметр $\frac{S_0 - S}{S_0}$ в зависимости от большого числа механических характеристик близлежащих породных слоев углевмещающей толщи. Поэтому была проведена оценка значимости этого влияния и установлено, что при прогнозе величины потери сечения следует учитывать такие механические характеристики: E_1^K оказывает влияние до 59,4%, E_2^K – до 10,5%, E_1^{Π} – до 24,0%, $\sigma_{сж1}^K$ – до 4,52 раз, $\sigma_{сж2}^K$ – до 61,8%, $\sigma_{сж1}^{\Pi}$ – до 3,21 раз, $\frac{M_1^K}{E_1^K}$ – до 44,8%, $\frac{M_1^{\Pi}}{E_1^{\Pi}}$ – до 17,5%, $\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}$ – до 60,4%, $\frac{(\sigma_{сж1}^{\Pi})^0}{\sigma_{сж1}^{\Pi}}$ – до 27,3%.

Таким образом, проанализированы закономерности развития перемещений на участках контура пластовой выработки, которые определяют степень ее эксплуатационной пригодности и выполнение (нарушение) требований правил безопасности. Выявленные закономерности формируют базу для разработки новой, более адекватной реальным условиям, методики прогноза проявлений горного давления в пластовой выработке, сооружаемой в слоистом массиве слабых пород.

ВЫВОДЫ

1. На величину опускания замка свода выработки наиболее существенное влияние оказывают механические характеристики первого и второго породных слоев кровли (в исследованном интервале их изменения): E_1^K – до

69%, E_2^K – до 11%, $\sigma_{сж1}^K$ – до 5,52 раз, $\sigma_{сж2}^K$ – до 2,07 раз, $\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}$ – до 2,0 раз, $\frac{(\sigma_{сж2}^K)^0}{\sigma_{сж2}^K}$ – до 10,8%, $\frac{M_1^K}{E_1^K}$ – до 59%. Перечисленные параметры необ-

ходимо учитывать при расчете перемещения замка свода в полость выработки.

2. Вертикальные перемещения свода выработки в зоне прохода людей составляют 64...71% от величины опускания замка свода, что указывает на его выполаживание и, соответственно, снижение несущей способности рамной крепи. Величина вертикальных перемещений свода в зоне прохода людей может достигать 400...500 мм (иногда более), что в ряде случаев приводит к нарушению требований правил безопасности. Существенное влияние

на величину перемещений оказывают следующие механические характеристики близлежащих породных слоев углевмещающей толщи: E_1^K – до 2 раз, $\sigma_{сж1}^K$ – до 8,14 раз, $\sigma_{сж2}^K$ – до 52%, совместное влияние параметров $\left(\frac{\sigma_{сж1}^K}{\sigma_{сж1}^K}\right)^0$ и $\frac{M_1^K}{E_1^K}$ запредельного состояния первого породного слоя кровли – до 3,66 раз.

3. Решающее воздействие на развитие боковых перемещений в зоне прохода людей (помимо глубины разработки) оказывают следующие механические характеристики близлежащих породных слоев углевмещающей толщи: E_1^K – до 2,01 раз, E_2^K – до 23,9%, E_1^II – до 15,2%, $\sigma_{сж1}^K$ – до 6,08 раз, $\sigma_{сж2}^K$ – до

32,3%, $\sigma_{сж1}^II$ – до 41,3%, $\left(\frac{\sigma_{сж1}^K}{\sigma_{сж1}^K}\right)^0$ – до 53,6%, $\frac{M_1^K}{E_1^K}$ – до 74,2% в исследуемом

диапазоне их изменения, характерном для углевмещающей толщи угольных пластов Западного Донбасса. Указанные характеристики обязательны к учету при прогнозе боковых перемещений пластовой выработки в зоне прохода людей.

4. Установлено, что величина сближения опор стоек рамной крепи определяется механическими характеристиками только первых породных слоев кровли и почвы угольного пласта: E_1^K – до 23,4%, E_1^II – до 2,01 раз, $\sigma_{сж1}^K$ –

до 84%, $\sigma_{сж1}^II$ – до 6,73 раз, $\left(\frac{\sigma_{сж1}^II}{\sigma_{сж1}^II}\right)^0$ – до 62,5%, $\frac{M_1^K}{E_1^K}$ – до 18%, $\frac{M_1^II}{E_1^II}$ – до

62,2%. Выявлен «эффект штампа», когда в вариантах более целостного и жесткого первого породного слоя кровли, он под воздействием опорного давления интенсифицирует перемещение пород почвы в районе опор стоек рамной крепи в полость выработки.

5. Эпюра пучения почвы штрека имеет асимметрию в сторону восстания пласта таким образом, что в зоне прохода людей в этой части выработки пучение составляет 0,67 от максимального (в центральной части выработки), а в зоне прохода людей со стороны падения – 0,57 от максимального вне зависимости от сочетания геомеханических факторов. На величину максимума пучения почвы существенное влияние (помимо глубины разработки) оказывают следующие механические характеристики только первых породных слоев кровли и почвы: E_1^K – до 19,2%, E_1^II – до 88,1%, $\sigma_{сж1}^K$ – до

72,9%, $\sigma_{сж1}^{\Pi}$ – до 8,1 раз, $\frac{(\sigma_{сж1}^{\Pi})^0}{\sigma_{сж1}^{\Pi}}$ – до 2,14 раз, $\frac{M_1^{\Pi}}{E_1^{\Pi}}$ – до 87,2%.

6. Общая величина поднятия почвы выработки включает две составляющие, отличающиеся между собой механизмом развития перемещений: собственно пучение – перемещение пород почвы в полость выработки под воздействием опорного давления в ее боках и разгруженной зоны непосредственно под выработкой; вдавливание опор стоек рамной крепи, обусловлено совместным действием вертикальной нагрузки на крепь и разупрочняющимися породами почвы под опорами стоек. Величина вдавливания опор стоек зависит от таких механических характеристик близлежащих породных слоев углевмещающей толщи: E_1^{Π} – до 32,3%, $\sigma_{сж2}^K$ – до 27,2%, $\sigma_{сж1}^K$ – до 66,5%,

$\sigma_{сж1}^{\Pi}$ – до 8,41 раз, $\frac{(\sigma_{сж1}^{\Pi})^0}{\sigma_{сж1}^{\Pi}}$ – до 46,4%.

7. В результате анализа закономерностей изменения контура пластовой выработки выявлена группа механических характеристик близлежащих породных слоев, оказывающая существенное влияние на величину потери сечения: E_1^K – до 59,4%, E_2^K – до 10,5%, E_1^{Π} – до 24,0%, $\sigma_{сж1}^K$ – до 4,52 раз,

$\sigma_{сж2}^K$ – до 61,8%, $\sigma_{сж1}^{\Pi}$ – до 3,21 раз, $\frac{M_1^K}{E_1^K}$ – до 44,8%, $\frac{M_1^{\Pi}}{E_1^{\Pi}}$ – до 17,5%,

$\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}$ – до 60,4%, $\frac{(\sigma_{сж1}^{\Pi})^0}{\sigma_{сж1}^{\Pi}}$ – до 27,3%. Перечисленные механические ха-

рактеристики обязательны к учету при прогнозе остаточного сечения выработки для оценки, например, эффективности проветривания соответствующего участка шахтного поля.

8. Установленные закономерности развития перемещений по всему контуру выработки, по которым судят о возможности ее безопасной эксплуатации, формируют базу для разработки новой, более адекватной реальным условиям, методики прогноза проявлений горного давления в пластовых выработках.

12. ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ПРОЕКТНОГО РЕШЕНИЯ ПО ВЫБОРУ ЕЕ ТИПОРАЗМЕРА

12.1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТИПОРАЗМЕРА ВЫРАБОТКИ НА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЕЕ КОНТУРА

На угольных шахтах, в том числе и Западного Донбасса, пластовые выработки (горизонтальные или с небольшим углом наклона до 6°) широко распространены и их можно разделить на две группы: участковые подготовительные выработки (выемочные штреки и ходки) и основные подготовительные выработки – магистральные штреки рабочего горизонта. Указанные выработки имеют существенно различные размеры с колебанием площади поперечного сечения до двух раз, иногда более [148, 149]. В нормативных методиках [156, 157, 164] изменение размеров выработки учитывается соответствующим коэффициентом, который постоянен вне зависимости от того, на каком участке контура выработки определяются перемещения. С другой стороны, на шахтах Западного Донбасса широко применяется крепь КШПУ, геометрия которой предусматривает существенные отличия контура выработки от таковой при традиционной крепи КМП-А3: уменьшенный радиус свода; более удлиненные и наклонные (к вертикальной оси) стойки рамы; по указанным факторам высота и ширина выработок с традиционной крепью КМП-А3 и крепью КШПУ отличается друг от друга при, примерно, одинаковой площади поперечного сечения. Тем не менее, в нормативной методике [157] эти отличия учитываются только коэффициентом (равным 1,1) работоспособности крепи, а какие-либо указания по учету изменений перемещений породного контура выработки отсутствуют.

По совокупности указанных причин выполнен комплекс исследований по выявлению закономерностей влияния размеров и формы выработки на эпюру смещений ее контура.

Форма выработки определяется применяемой крепью, что потребовало рассмотрения двух групп типовых сечений – с крепью КМП-А3 и крепью КШПУ. Внутри каждой группы выбрано по три типоразмера, которые охватывают наиболее применяемый интервал поперечных сечений выработок на шахтах Западного Донбасса:

- КМП-А3-9,2; КМП-А3-13,8; КМП-А3-18,3;
- КШПУ-9,5; КШПУ-14,4; КШПУ-17,7.

Выбранные типоразмеры двух групп минимально отличаются между со-

бой по площади поперечного сечения, а вариант сечения выработки с крепью КМП-А3-13,8 уже был детально исследован в предыдущих разделах.

Следующий вопрос касается выбора наиболее объективного параметра, характеризующего конкретное сечение выработки. В нормативной методике [157] использована величина площади поперечного сечения в свету $S_{св}$ для определения соответствующего поправочного коэффициента, однако не указывается какому периоду работы крепи соответствует значение $S_{св}$ – до или после осадки. На наш взгляд, за базовый параметр следует использовать $S_{св}$ до осадки, а изменение поперечного сечения в процессе эксплуатации выработки определяется разрабатываемой методикой прогноза. Параметр $S_{св}$ также отражает и величину площади сечения выработки в проходке S_{np} , поскольку моделируются все конструктивные особенности крепи и закрепного пространства и параметр S_{np} отображается автоматически.

Таким образом, смоделированы шесть типоразмеров выработки с крепями КМП-А3 и КШПУ.

На заключительном этапе обоснования методики исследований необходимо выбрать наиболее объективно отражающие варианты сочетаний геомеханических параметров системы «массив-крепь».

Глубина расположения выработки при пошаговом алгоритме расчета НДС (в запредельном состоянии) изменяется непрерывно и не участвует в формировании вариантов расчета.

Деформационные характеристики допредельного состояния породных слоев кровли и почвы $E_i^{K,II}$ и $\mu_i^{K,II}$ не влияют на вид функции связи перемещений контура выработки и площади ее поперечного сечения в свету. Поэтому, аналогично зависимости (11.1), можно влияние $E_i^{K,II}$ выразить в виде функции-сомножителя в общей зависимости перемещений, а варианты различных $S_{св}$ просчитать только для одного значения $E_i^{K,II}$ (например, $0,3 \cdot 10^4$ МПа). Остальные варианты по параметрам $\sigma_{сж_i}^{K,II}$ определяются из ранее установленных закономерностей.

Прочностные характеристики $\sigma_{сж_i}^{K,II}$ и параметры запредельного состоя-

ния близлежащих породных слоев $\frac{(\sigma_{сж_i}^{K,II})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,II}}$ и $\frac{M_i^{K,II}}{E_i^{K,II}}$ требуют более деталь-

ного анализа в плане влияния на вид функции $U_i^{x,y}(S_{св})$. Поэтому для более объективного анализа были рассмотрены две группы вариантов сочетаний вышеуказанных параметров.

Первая группа вариантов касается сочетаний $\sigma_{сж_1}^{K,П}$ близлежащих породных слоев углевмещающей толщи, отображенных в табл. 7.1. Здесь для адекватного отражения закономерностей влияния достаточно восьми «разнополюсных» вариантов №№1, 3, 7, 8, 10, 14, 16 и 18 из табл. 7.1.

Вторая группа вариантов касается параметров запредельного состояния, которые, как показали исследования предыдущего раздела, оказывают заметно меньшее влияние на развитие перемещений контура выработки. Здесь предусмотрено четыре варианта крайних сочетаний параметров

$\frac{(\sigma_{сж_1}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_1}^{K,П}}$ и $\frac{M_1^{K,П}}{E_1^{K,П}}$, так как аналогичные параметры второго породного слоя

кровли не оказывают существенного влияния на перемещения выработки, что было установлено в предыдущем разделе. В данных вариантах соеди-

нены крайние значения $\frac{(\sigma_{сж_1}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_1}^{K,П}}$ и $\frac{M_1^{K,П}}{E_1^{K,П}}$ на том основании [135, 140, 145],

что более хрупкая порода (повышенный модуль спада) отличается пониженной остаточной прочностью, а более пластичная (пониженный модуль спада) – повышенной величиной остаточной прочности. Тогда четыре варианта сочетаний параметров запредельного состояния первых слоев кровли и почвы имеют вид:

$$\text{№1} - \frac{(\sigma_{сж_1}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_1}^{K,П}} = 0,1, \quad \frac{M_1^{K,П}}{E_1^{K,П}} = 3;$$

$$\text{№2} - \frac{(\sigma_{сж_1}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_1}^{K,П}} = 0,2, \quad \frac{M_1^{K,П}}{E_1^{K,П}} = 0,5;$$

$$\text{№3} - \frac{(\sigma_{сж_1}^K)^0}{\sigma_{сж_1}^K} = 0,1, \quad \frac{(\sigma_{сж_1}^П)^0}{\sigma_{сж_1}^П} = 0,2, \quad \frac{M_1^K}{E_1^K} = 3, \quad \frac{M_1^П}{E_1^П} = 0,5;$$

$$\text{№4} - \frac{(\sigma_{сж_1}^K)^0}{\sigma_{сж_1}^K} = 0,2, \quad \frac{(\sigma_{сж_1}^П)^0}{\sigma_{сж_1}^П} = 0,1, \quad \frac{M_1^K}{E_1^K} = 0,5, \quad \frac{M_1^П}{E_1^П} = 3.$$

Параметры запредельного состояния остальных породных слоев и угольного пласта остаются постоянными.

Таким образом, к расчету НДС сформировано 160 вариантов (с учетом

того, что типоразмер выработки с крепью КМП-А3-13,8 уже просчитан), на базе которых установлены закономерности влияния типоразмера выработки на развитие перемещений ее контура.

12.2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ ТИПОРАЗМЕРА ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ НА ЭПЮРУ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЕЕ КОНТУРА

Как отмечалось ранее, одна из особенностей разрабатываемой методики является дифференциация закономерностей развития перемещений по отдельным участкам контура выработки: кровля (замок свода, зона прохода людей), бока (зона прохода людей, опоры стойки рамы), почва (центральная часть выработки, зона прохода людей, вдавливание опор стоек рамы в почву). На интенсивность процесса перемещения контура выработки наиболее сильное воздействие оказывает глубина разработки и расчетное сопротивление сжатию $\sigma_{сжi}^{K,П}$ близлежащих

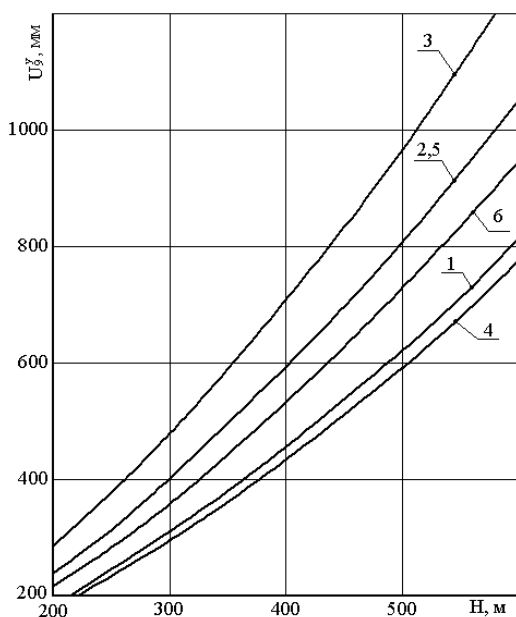


Рис. 12.1. Закономерности развития опускания U_y^y замка свода с ростом глубины H разработки для типоразмеров выработок: 1 – КМП-А3-9,2; 2 – КМП-А3-13,8; 3 – КМП-А3-18,3; 4 – КШПУ-9,5; 5 – КШПУ-14,4; 6 – КШПУ-17,7

породных слоев углевмещающей толщи (см. раздел 11). Поэтому, в первую очередь, внимание уделено графической иллюстрации закономерностей влияния сечения выработки в свету $S_{св}$ на функции $U^{x,y}(H, \sigma_{сжi}^{K,П})$ в различных точках контура выработки. Влияние $S_{св}$ на функции связи $U^{x,y}$ с другими механическими характеристиками близлежащих породных слоев также было оценено и использовано в разрабатываемой методике прогноза перемещений контура пластовой выработки.

Исследование функций $U^{x,y}(S_{св})$ выполнено, начиная с кровли выработки. На рис. 12.1 приведены зависимости роста опускания замка свода U_y^y с уве-

величением глубины разработки H для различных типоразмеров выработок. Видно, что перемещение контура выработки увеличивается с глубиной разработки и различается по величине для разных типоразмеров. Влияние $S_{св}$ на функции связи $U^{x,y}$ с другими механическими характеристиками близлежащих породных слоев также было оценено и использовано в разрабатываемой методике прогноза перемещений контура пластовой выработки.

личением глубины разработки для трех типовых сечений с крепью КМП-А3 и трех типовых сечений с крепью КШПУ. Анализ этих зависимостей выявил ряд закономерностей влияния S_{ce} на перемещения замка свода:

– четко прослеживается нелинейность функций $U_9^y(S_{ce})$ в отличие от линейной зависимости по нормативной методике [157]. Выявленная нелинейность $U_9^y(S_{ce})$ вытекает из самой физической сущности исследуемой геомеханической задачи, где перемещения прямо пропорциональны линейным размерам выработки, а от ее площади S_{ce} имеют степенную зависимость. Так, для крепи КМП-А3 увеличение S_{ce} на $4,6 \text{ м}^2$ (от $9,2 \text{ м}^2$ до $13,8 \text{ м}^2$) способствует росту U_9^y на 28,9%, а почти такое же увеличение S_{ce} на $4,5 \text{ м}^2$ (от $13,8 \text{ м}^2$ до $18,3 \text{ м}^2$) снижает интенсивность роста до 20,2%. Еще большая нелинейность $U_9^y(S_{ce})$ наблюдается для крепи КШПУ;

– перемещения U_9^y при, примерно, одинаковой величине S_{ce} всегда меньше для типового сечения с крепью КШПУ и эта разница с ростом S_{ce} увеличивается: 6,7% – для $S_{ce} = 9,2 \text{ м}^2$ и $9,5 \text{ м}^2$; 13,4% – для $S_{ce} = 13,8 \text{ м}^2$ и $14,4 \text{ м}^2$; 18,7% – для $S_{ce} = 18,3 \text{ м}^2$ и $17,7 \text{ м}^2$. Это объясняется тем, что форма крепи КШПУ такова, что более эффективно противодействует вертикальным нагрузкам [173], в том числе и за счет уменьшенного радиуса свода. С увеличением S_{ce} радиус свода в крепях КШПУ растет менее интенсивно, поэтому темпы роста перемещений U_9^y также замедлены в сравнении с выработками, где предусмотрены крепи серии КМП-А3;

– наблюдается стабильность отношения перемещений U_9^y для разных типоразмеров сечений выработки вне зависимости от глубины ее расположения, что указывает на независимость функции $U_9^y(S_{ce})$ от H и ее можно использовать в качестве множителя к ранее установленным закономерностям связи развития перемещений U_9^y с геомеханическими параметрами системы по аналогии с поправочным коэффициентом сечения выработки в нормативной методике [157].

Отмеченные особенности функции $U_9^y(S_{ce}, H)$ стабильно проявляются и при варьировании прочностных характеристик $\sigma_{сж_i}^{K,П}$ близлежащих породных слоев (рис. 12.2), что подтверждает вывод о возможности корректировки перемещений U_9^y функцией $U_9^y(S_{ce})$, постоянной при различных вариантах сочетаний параметров H и $\sigma_{сж_i}^{K,П}$.

Изменение характеристик запредельного состояния $\frac{(\sigma_{сж1}^{К,П})^0}{\sigma_{сж1}^{К,П}}$ и $\frac{M_1^{К,П}}{E_1^{К,П}}$

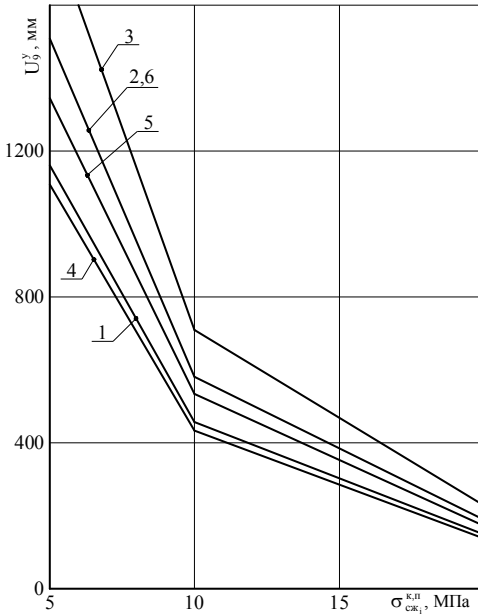


Рис. 12.2. Закономерности связи опускания U_9^y замка свода с расчетным сопротивлением сжатию $\sigma_{сж1}^{К,П}$ близлежащих породных слоев для типоразмеров выработки: 1 – КМП-А3-9,2; 2 – КМП-А3-13,8; 3 – КМП-А3-18,3; 4 – КШПУ-9,5; 5 – КШПУ-14,4; 6 – КШПУ-17,7

ента, равного 0,62...0,71.

Анализ влияния типоразмера выработки на развитие боковых перемещений в зоне прохода людей $U_{4,5}^x$ и опор стоек рамной крепи $U_{1,17}^x$ выявил следующие закономерности:

– с увеличением $S_{св}$ стабильно возрастают боковые перемещения (в исследуемом интервале изменения $S_{св}$): для выработок с крепью КМП-А3 в зоне прохода людей – до 49,5%, в опорах стоек – до 51%, то есть закономерности связи $U_{4,5}^x$ и $U_{1,17}^x$ с площадью поперечного сечения выработки в свету примерно одинаковы; для выработок с крепью КШПУ в зоне прохода

также подтверждает независимость функции $U_9^y(S_{св})$ от различных сочетаний указанных параметров.

Таким образом, очевиден вывод о том, что установленные закономерности влияния типоразмера выработки (отдельно для крепей КМП-А3 и КШПУ) можно использовать как множитель для общей закономерности развития опускания замка свода U_9^y .

Исследованиями вертикальных перемещений участка свода в зоне прохода людей $U_{4,5}^y$ при разных типоразмерах выработки доказана стабильность отношения

$$\frac{U_{4,5}^y}{U_9^y} = 0,62...0,71 \text{ вне зависимости}$$

от вариантов сочетаний геомеханических параметров системы «массив-крепь». Это позволяет для определения $U_{4,5}^y$ использовать закономерности $U_9^y(S_{св})$ с учетом понижающего коэффициента

людей – до 46,9%, в опорах стоек – до 55,7%, то есть рост $U_{1,17}^x$ происходит более интенсивно;

– боковые перемещения для типовых сечений с крепью КШПУ стабильно больше, чем для типоразмеров с крепью КМП-А3: в зоне прохода людей – на 14,0...16,4%; в опорах стоек рам – на 32,7...44,3%. Это обусловлено действием двух факторов. Первый – высота выработки с крепью КШПУ как правило больше, чем таковая с крепью КМП-А3 для примерно одинаковой площади их сечения, что снижает сопротивление рамы боковым нагрузкам. Второй – наклон стоек рамной крепи КШПУ к вертикальной оси выработки создает дополнительный момент от вертикальных нагрузок, усиливающих процесс бокового перемещения стоек крепи КШПУ;

– разница в степени увеличения перемещений на уровне прохода людей и в опорах стоек объясняется тем, что поворот стоек внутрь выработки происходит в основном относительно пластического шарнира в районе замков рамы и плечо поворота для опоры стойки намного больше, чем для зоны прохода людей;

– интенсивный изгиб прямолинейной части стоек на больших глубинах, наблюдаемый у крепи КМП-А3 (особенно, со стороны восстания пласта), для крепи КШПУ выражен менее явно и прямолинейная часть стоек в значительной степени сохраняет свою первоначальную (прямолинейную) геометрию. Это обусловлено совместным действием трех факторов. Первый – изгибающий момент от боковых нагрузок и второй – момент от горизонтальных перемещений почвы под опорами стойки рамы изгибают стойку моментом, действующим против часовой стрелки. Третий фактор – изгибающий момент по часовой стрелке от части компенсирует изгиб стойки и формируется за счет вертикальных нагрузок, действующих на наклонную прямолинейную часть стойки крепи КШПУ;

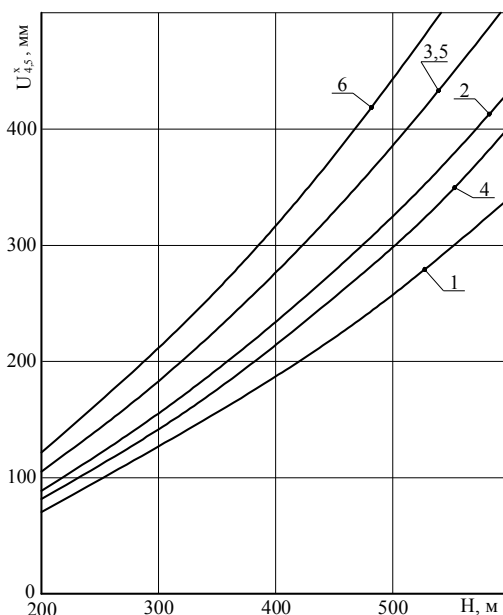


Рис. 12.3. Горизонтальное перемещение $U_{4,5}^x$ стойки рамы в зоне прохода людей с ростом глубины разработки для типоразмеров выработки:
1 – КМП-А3-9,2; 2 – КМП-А3-13,8;
3 – КМП-А3-18,3; 4 – КШПУ-9,5;
5 – КШПУ-14,4; 6 – КШПУ-17,7

– геомеханические параметры системы «массив-крепь» влияют на боковые перемещения выработки с закономерностями, не зависящими от ее типового сечения, что позволяет произвести учет размеров выработки в виде функции-сомножителя $\Phi(S_{св})$ к стабильной функции связи горизонтальных перемещений с геомеханическими параметрами. Для наглядного примера

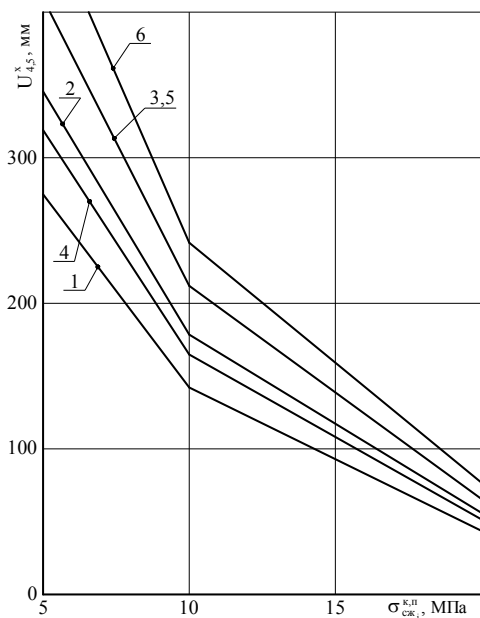


Рис. 12.4. Горизонтальное перемещение $U_{4,5}^x$ стойки рамы в зоне прохода людей

в зависимости от $\sigma_{сжi}^{K,II}$ для типоразме-

ров выработки:

- 1 – КМП-А3-9,2; 2 – КМП-А3-13,8;
- 3 – КМП-А3-18,3; 4 – КШПУ-9,5;
- 5 – КШПУ-14,4; 6 – КШПУ-17,7

приведены зависимости $U_{4,5}^x(H)$ при $\sigma_{сжi}^{K,II} = 10$ МПа (рис. 12.3) и

$U_{4,5}^x(\sigma_{сжi}^{K,II})$ при $H = 400$ м (рис. 12.4)

для шести типовых сечений выработки, доказывающие обоснованность такого решения. Так, разница $U_{4,5}^x$ для КМП-А3-9,2 и КШПУ-17,7 на глубине $H = 200$ м составляет 71,8%, а на глубине $H = 600$ м – 70,9%, то есть практически постоянна вне зависимости от глубины расположения выработки (см. рис. 12.3). Разница в перемещениях $U_{4,5}^x$ для КМП-А3-13,8 и КШПУ-14,4 составляет 18,4% при $\sigma_{сжi}^{K,II} = 5$ МПа и

17,9% при $\sigma_{сжi}^{K,II} = 20$ МПа (см.

рис. 12.4). Такое же постоянство отношений $U_{4,5}^x$ для различных типоразмеров выработки имеет место при вариации характеристик предельного состояния близлежащих породных слоев.

Анализ горизонтальных перемещений опор стоек рамы $U_{1,17}^x$ подтверждает стабильность функций влияния типоразмера выработки вне зависимости от геомеханических параметров системы.

Связь пучения почвы с типоразмерами сечения пластовых выработок имеет следующие закономерности:

– максимум пучения U_{20}^y практически одинаков для типовых сечений выработок с креплениями КМП-А3 и КШПУ, что обусловлено, на наш взгляд, незначительными колебаниями ширины выработок с примерно равной площадью

сечения в свету. Такое объяснение вытекает из результатов исследований, установивших, что ширина выработки по почве является одним из главных факторов (помимо геомеханических параметров), который определяют интенсивность пучения почвы в слабых породах;

– интенсивность роста пучения пород почвы с увеличением $S_{св}$ оказалась несколько выше (для КМП-А3 на 4,0...4,9%; для КШПУ на 2,7...22,1%), чем опускание кровли, что может быть объяснено отсутствием в почве выработки крепежных элементов (обратного свода) и менее устойчивой плоской поверхностью почвы в отличие от сводообразной формы кровли. Так, для исследованных трех типоразмеров сечений с крепью КМП-А3 рост перемещений замка свода составил 54,9%, а пучения почвы – 68,9%; для трех типоразмеров с крепью КШПУ различия более существенны: в кровле 35%, в почве рост составил 60,5%;

– форма контура почвы выработки достаточно постоянна в виде неправильного полуэллипса, когда со стороны восстания пласта перемещения почвы выше на 8,3...17,5%. Отношения перемещений U_{18}^y и U_{22}^y к максимуму

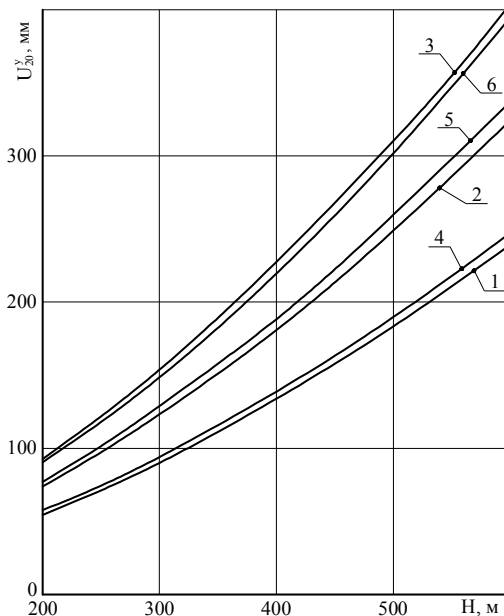


Рис. 12.5. Максимум U_{20}^y поднятия почвы с ростом глубины разработки для типоразмеров выработок:
1 – КМП-А3-9,2; 2 – КМП-А3-13,8;
3 – КМП-А3-18,3; 4 – КШПУ-9,5;
5 – КШПУ-14,4; 6 – КШПУ-17,7

U_{20}^y , характеризующих центральную часть выработки (2/3 от ее ширины по почве), весьма стабильны (вне зависимости от типоразмера выработки) и

усредненное их значение составляет: для крепи КМП-А3 $\frac{U_{18}^y}{U_{20}^y} = 0,67$ и

$\frac{U_{22}^y}{U_{20}^y} = 0,57$; для крепи КШПУ $\frac{U_{18}^y}{U_{20}^y} = 0,65$ и $\frac{U_{22}^y}{U_{20}^y} = 0,60$. По этим отношениям

можно судить, например, об угле наклона рельсового пути в двухпутевых выработках и проводить сравнение с допустимыми нормами эксплуатации подвижного состава;

– закономерности влияния типоразмера выработки на пучение ее почвы аналогичны таковым для перемещений кровли и боков в части независимости функции $U_{18,20,22}^y(S_{св})$ от геомеханических параметров системы. Для доказательства данного факта на рис. 12.5 и рис. 12.6 приведены закономерности связи максимума U_{20}^y пучения пород почвы с глубиной разработки и

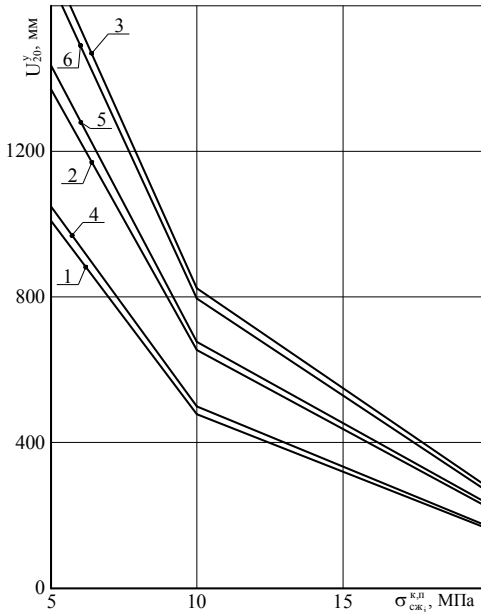


Рис. 12.6. Максимум U_{20}^y поднятия почвы

в зависимости от $\sigma_{сж,i}^{К,П}$ для

типоразмеров выработки:

1 – КМП-АЗ-9,2; 2 – КМП-АЗ-13,8;

3 – КМП-АЗ-18,3; 4 – КШПУ-9,5;

5 – КШПУ-14,4; 6 – КШПУ-17,7

сопротивлением сжатию $\sigma_{сж,i}^{К,П}$

близлежащих породных слоев для шести типовых сечений с крепями КМП-АЗ и КШПУ.

В предыдущем разделе было отмечено, что вдавливание стоек рамы в почву приводит к уменьшению остаточного сечения выработки и данное явление обязательно к учету при прогнозе ее эксплуатационного состояния. В этой связи установлен ряд особенностей влияния типоразмера выработки на величину вдавливания $U_{1,17}^y$ опор стоек в почву:

– с увеличением площади сечения выработки возрастает суммарная вертикальная нагрузка на нее, которая передается на опоры стойки и увеличивает глубину их внедрения в почву. В исследуемом диапазоне $S_{св}$ глубина вдавливания опор увеличивается до 36,9% для выработок с крепью КМП-АЗ и до 42,1% для выработок с крепью КШПУ;

– глубина вдавливания стоек для крепи КШПУ на 12,0...20,6% выше, чем для крепи КМП-АЗ при прочих равных условиях.

Глубина вдавливания $U_{1,17}^y$ опор стоек должна приплюсовываться к величине пучения почвы для оценки общей величины сближения «кровля-почва» и потери сечения выработки.

Выявленные закономерности влияния типоразмера выработки в интегральной форме проявляются на изменении площади ее поперечного сечения и, в частности, на такой относительной характеристике, как потеря площади сече-

ния $\frac{\Delta S_{св}}{S_{св}}$ выработки в свету, для которой на рис. 12.7 приведены отдельные зависимости для $E_i^{K,II} = 0,3 \cdot 10^4$ МПа и $\sigma_{сжi}^{K,II} = 10$ МПа. Обращает внимание

рост потери сечения пластовой выработки по степенной зависимости с увеличением глубины ее расположения при относительно небольших отклонениях для разных типоразмеров выработки. Так, для типоразмеров выработок с крепью КМП-А3 увеличение площади поперечного сечения в свету $S_{св}$ от $9,2 \text{ м}^2$ до $18,3 \text{ м}^2$ способствует росту потери сечения всего на 8,8% на глубине $H = 200$ м и на 3,6% на глубине $H = 600$ м; для типоразмеров выработок с крепью КШПУ рост потери сечения составляет 6,2% и 6,4% соответственно при сравнении типовых сечений КШПУ-9,5 и КШПУ-17,7. Потеря сечения для типоразмеров выработок (примерно равноценных) с крепью КШПУ несколько выше (до 8,2...10,6%), чем с крепью КМП-А3. Это обусловлено более интенсивным сближением боков у крепи КШПУ из-за удлиненных стоек рамы, которые поворачиваются относительно пластического шарнира, возникающего в районе пяты свода. Кроме того, стойки крепи КШПУ вдавливаются в почву на несколько большую величину, чем у крепи КМП-А3.

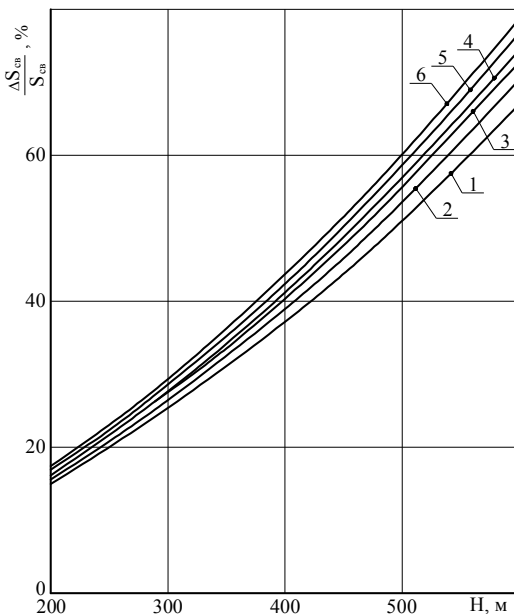


Рис. 12.7. Потеря сечения штрека $\frac{\Delta S_{св}}{S_{св}}$ в зависимости от глубины разработки для типоразмеров выработки:
1 – КМП-А3-9,2; 2 – КМП-А3-13,8;
3 – КМП-А3-18,3; 4 – КШПУ-9,5;
5 – КШПУ-14,4; 6 – КШПУ-17,7

В целом, достаточная независимость величины потери сечения от типоразмера выработки наблюдается при различных сочетаниях геомеханических параметров системы «массив-крепь» и объясняется компенсацией прироста смещений контура при увеличении $S_{св}$ (см. рис. 12.1-рис. 12.6) ростом самой площади сечения выработки в свету, которая является знаменателем в формуле относительного параметра – потеря сечения штрека под воздействием проявлений горного давления.

12.3. ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ПРОГНОЗА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ КОНТУРА ВЫРАБОТКИ

Основные результаты проведенных исследований всесторонне проанализированы на предмет сравнения с существующими общепринятыми методиками расчета проявлений горного давления для оценки сходных и отличительных черт установленных закономерностей и степени их достоверности при прогнозе эксплуатационного состояния пластовой выработки.

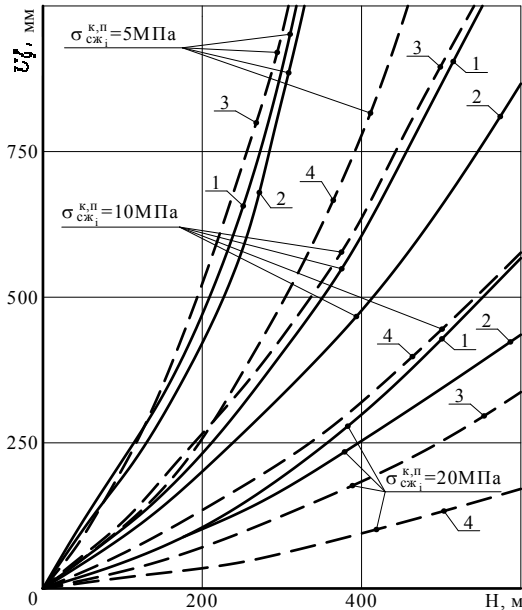


Рис. 12.8. Перемещения в замке свода выработки (срок службы более 15 лет) по нормативным документам (—) и установленным закономерностям (---): 1 — [175]; 2 — [174]; 3 — $E_i^{K,П} = 0,3 \cdot 10^4 \text{ МПа}$; 4 — $E_i^{K,П} = 1 \cdot 10^4 \text{ МПа}$

В этой связи, наиболее объективно, на наш взгляд, будет комплексное сравнение с аналитико-эмпирическими методиками, построенными на базе обширных шахтных исследований проявлений горного давления, и аналитическими методами, учитывающими характеристики запредельного состояния вмещающего массива, которые в шахтном эксперименте выявить и разделить чрезвычайно затруднительно.

К настоящему времени разработан и повсеместно используется ряд руководящих нормативных документов [156, 157, 164], где в качестве базового прогнозируемого параметра проявлений горного давления использованы перемещения породного контура выработки, технология замера которых в шахтных условиях отработана и не вызывает затруднений. С другой стороны, особенности влияния

характеристик запредельного состояния массива на развитие перемещений контура выработки (которые в нормативных документах выражены в интегральной форме) оцениваются по известным и апробированным аналитическим методам [135, 140].

Предварительно отметим, что установленные закономерности позволяют определить эпюру полных перемещений в любой точке контура выработки, в то время как «базовые» (с точки зрения сравнительного анализа) методики способны прогнозировать лишь кусочно-линейную эпюру перемещений,

равномерную в пределах кровли, боков и почвы выработки. Поэтому сравнительный анализ проведен для максимумов вертикальных перемещений в замке свода U_9^y и в районе оси выработки по почве U_{20}^y , а также для горизонтальных перемещений боков выработки $U_{4,5}^x$ в зоне прохода людей.

Сравнение перемещений замка свода выработки вне зоны влияния очистных работ, рассчитанных по методикам [156, 164], с установленными закономерностями дало такие результаты (рис. 12.8). Качественно закономерности развития смещений подобны друг другу. В количественном плане при $\sigma_{сжi}^{K,П} = 5$ МПа и 10 МПа расчеты смещений в замке свода U_9^y по нормативным методикам ложатся в область U_9^y для интервала изменения $E_i^{K,П} = (0,3...1) \cdot 10^4$ МПа по установленным закономерностям. При $\sigma_{сжi}^{K,П} = 20$ МПа смещения U_9^y занижены по сравнению с [151, 164]. Здесь следует отметить, что в нормативных методиках не учитываются деформационные характеристики близлежащих породных слоев в отличие от установленных закономерностей. Поэтому при определенных сочетаниях деформационных характеристик породных слоев будет

иметь место вполне удовлетворительное соответствие результатов расчетов U_9^y , как это выявилось, например, при $E_i^{K,П} = 0,3 \cdot 10^4$ МПа для $\sigma_{сжi}^{K,П} = 5$ МПа и 10 МПа (отклонения с методикой [164] не превышают 11,3%). С другой стороны, вследствие действия увлажнения и реологических процессов деформационные характеристики породы снижаются, что вызывает увеличение перемещений U_9^y , и при $\sigma_{сжi}^{K,П} = 20$ МПа вполне возможно снижение отклонений в расчетах по анализируемой методике. Также

следует принимать во внимание влияние параметров $\frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}}$ и $\left(\frac{\sigma_{сжi}^{K,П}}{\sigma_{сжi}^{K,П}}\right)^0$,

которые в действующих нормативных документах не учитываются: исследования [135, 140] доказывают тенденцию увеличения перемещений породного

контура с ростом $\frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}}$ и снижением $\left(\frac{\sigma_{сжi}^{K,П}}{\sigma_{сжi}^{K,П}}\right)^0$. Поэтому установленные за-

кономерности, учитывающие гораздо большее количество механических характеристик слоистого массива, обладает более общим (с точки зрения геомеханических процессов) подходом к оценке устойчивости пластовой выработки.

Инструкция [157] разработана специально для условий шахт Западного Донбасса и отличается от предыдущих нормативных документов тем, что даже вне зоны влияния очистных работ предполагает постоянный и равномерный во времени (за исключением начального периода в 20...40 суток после проведения выработки) рост перемещений породного контура. Действительно, в Западном Донбассе развитие перемещений протекает более длительный период, однако все же наблюдается эффект затухания скорости перемещения по мере эксплуатации подготовительных выработок, как это учтено в [156, 164]. Тем не менее, на рис. 12.9 построены графики роста перемещений породного контура с увеличением H для периода эксплуатации выработки $t=1$ год и 5 лет (сплошные линии) и проведено их сравнение с аналогичными зависимостями по установленным закономерностям, для которого построены графики при

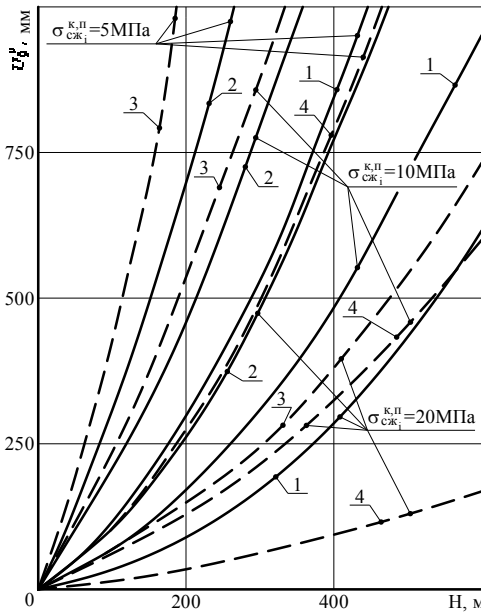


Рис. 12.9. Перемещения в замке свода выработки по инструкции [157] (—) и установленным закономерностям (---) при: 1 — $t = 1$ год; 2 — $t = 5$ лет;

$$3 - \left(\frac{\sigma_{сж_i}^{К,П}}{\sigma_{сж_i}^{К,П}} \right)^0 = 0,05;$$

$$4 - \left(\frac{\sigma_{сж_i}^{К,П}}{\sigma_{сж_i}^{К,П}} \right)^0 = 0,20$$

точниках). Таким образом, отношение $\frac{\left(\frac{\sigma_{сж_i}^{К,П}}{\sigma_{сж_i}^{К,П}} \right)^0}{\sigma_{сж_i}^{К,П}}$ по мере эксплуатации выра-

ботки будет снижаться и образуется некоторая область, в которую попадает семейство зависимостей $U_{\rho}^y(H)$; для того, чтобы дать точное числовое различие в вычислениях U_{ρ}^y , необходим учет всей гаммы механических характеристик углевмещающего массива в нормативных методиках, что, к сожа-

влению, в Западном Донбассе развитие перемещений протекает более длительный период, однако все же наблюдается эффект затухания скорости перемещения по мере эксплуатации подготовительных выработок, как это учтено в [156, 164]. Тем не менее, на рис. 12.9 построены графики роста перемещений породного контура с увеличением H для периода эксплуатации выработки $t=1$ год и 5 лет (сплошные линии) и проведено их сравнение с аналогичными зависимостями по установленным закономерностям, для которого построены графики при $\left(\frac{\sigma_{сж_i}^{К,П}}{\sigma_{сж_i}^{К,П}} \right)^0 = 0,05$ и $0,20$. Это сделано

с учетом предположения, что во времени остаточная прочность пород (под действием ослабляющих факторов) снижается более интенсивно, чем прочность ненарушенных пород (специальных измерений на этот счет авторы не обнаружили в современных ис-

лению, пока не осуществлено. Из всего семейства $U_9^y(H)$ выпадает только

вариант $\sigma_{сж_i}^{K,П} = 20$ МПа, $\frac{(\sigma_{сж_i}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,П}} = 0,2$, хотя существует тенденция [135]

снижения $\frac{(\sigma_{сж_i}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,П}}$ по мере увели-

чения прочностных характеристик породы.

Теперь перейдем к сравнению величины перемещений $U_{4,5}^x$ в боках выработки на высоте зоны прохода людей. В нормативных документах [156, 157, 164] отношение перемещений в боках и кровле (почве) регулируется постоянным коэффициентом, равным 0,35 для выработок, пройденных по простиранию на пологих угольных пластах. Причем, считается, что величина $U^x(y)$ постоянна по высоте выработки, хотя расчеты показывают переменное перемещение боков выработки по ее высоте. Поэтому координаты боков выработки зафиксированы некоторым средним значением (район прохода людей) ее высоты и для них проведено сравнение с установленными закономерностями (рис. 12.10).

Закономерности $U_{4,5}^x(H)$ имеют одинаковую качественную картину, а в количественном плане необходимо отметить следующее:

– для однородного по механическим характеристикам близлежащего породного массива рассчитанное усредненное отношение

$$\frac{U_{4,5}^x}{U_9^y} = 0,30...0,36 \text{ близко к рекомендуемому (0,35) по нормативным методи-}$$

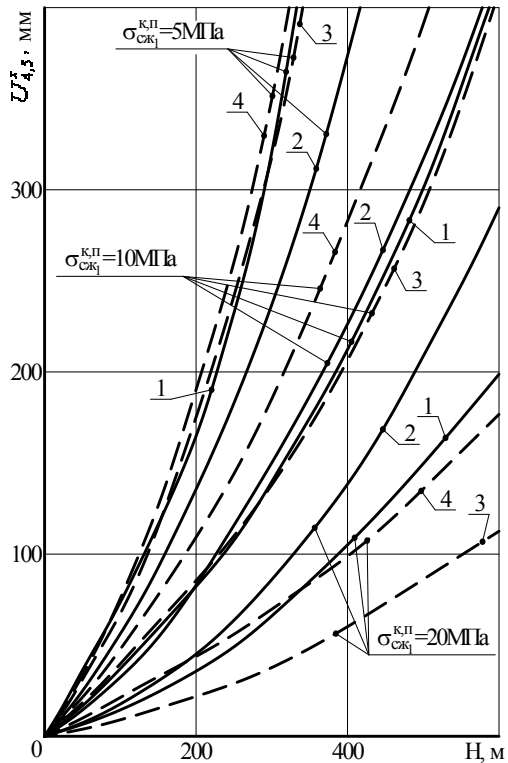


Рис. 12.10. Боковые перемещения в зоне прохода людей по нормативным документам (—) и установленным закономерностям (---): 1 – [175], $t \geq 15$ лет; 2 – [176], $t = 2$ года; 3 – $\sigma_{сж_i}^{K,П} = 5$ МПа, $E_i^{K,П} = 0,3 \cdot 10^4$ МПа; 4 – $\sigma_{сж_2}^K = 20$ МПа, $E_2^K = 1 \cdot 10^4$ МПа

кам [156, 157, 164]; поэтому отклонения функций $U_{4,5}^x(H)$ относительно невелики;

– когда в кровле выработки залегает более крепкий и жесткий второй породный слой ($\sigma_{сж2}^K = 20$ МПа, $E_2^K = 1 \cdot 10^4$ МПа), то усредненное отношение

$\frac{U_{4,5}^x}{U_9^y}$ увеличивается до 0,56...0,59. Это объясняется механизмом развития

боковых перемещений, когда более крепкий и жесткий второй породный слой кровли действует как штамп, выдавливая в полость выработки более слабые и менее жесткие первые породные слои кровли и почвы.

Что касается числовых значений отклонений, то при $\sigma_{сжi}^{K,II} = 5$ МПа и 10 МПа они составляют с [164] не более 5,8%, при $\sigma_{сжi}^{K,II} = 20$ МПа и $E_2^K = 0,3 \cdot 10^4$ МПа отклонения $U_{4,5}^x$ увеличиваются до 45...56%, при $E_2^K = 1 \cdot 10^4$ МПа разница в боковых смещениях уменьшается до 6,3...8,8%. Методика [157] по сравнению с [164] дает заниженные боковые смещения при $\sigma_{сжi}^{K,II} = 5$ МПа, примерно, равную величину $U_{4,5}^x$ при $\sigma_{сжi}^{K,II} = 10$ МПа и завышенное $U_{4,5}^x$ при $\sigma_{сжi}^{K,II} = 20$ МПа.

Анализируя развитие перемещений в почве выработки по нормативным документам и установленным закономерностям необходимо отметить следующее:

– в методиках [156, 164] величина перемещений в кровле и почве принимается одинаковой;

– в методике [157] величина перемещения в почве оказывается несколько выше, чем в кровле. Однако с увеличением срока эксплуатации выработки t эта разница нивелируется; так, при $t = 1$ год смещение в почве превышает смещение в кровле в 1,52...1,74 раза, при $t = 10$ лет – в 1,10...1,27 раза;

– следует более внимательно подходить к результатам экспериментальных замеров смещений в кровле и почве: в большинстве публикаций либо не указывается методика измерения, либо она описывается таким образом, что разделить смещения в кровле и почве невозможно и, по сути, приводится величина сближения кровли и почвы – ведь известно, что для осуществления такого разделения необходимо вести маркшейдерскую съемку от более – менее неподвижной отметки в районе околоствольного двора. Кроме того, в слабых породах почвы наблюдается эффект вдавливания стоек рамной крепи, даже при наличии подпятников. Поэтому, следует также разделять величину вдавливания $U_{i,17}^y$ стоек в почву (под действием преимущественно вертикальных сил горного давления в кровле) и величину непосредственно пуче-

ния самой почвы. По нашим расчетам и шахтным наблюдениям $U_{1,17}^y = 0,1...0,5$ м; это значение (когда измеряется сближение кровли и почвы) следует приплюсовывать к перемещениям кровли U_9^y и отнимать от перемещений почвы U_{20}^y – тогда разница между U_9^y и U_{20}^y будет нивелироваться.

Указанные причины способствовали появлению различий в конечных результатах прогноза пучения почвы выработки при малом сроке ($t=1$ год) ее эксплуатации (рис. 12.11, семейство кривых 1 и 2). Представление методики [157] о незатухающем во времени развитии перемещений породного контура (в том числе и почвы при $t > 1$ года еще более усиливают расхождения с результатами расчета U_{20}^y по методике [164]. В этой связи численные значения закономерностей развития пучения, рассчитанные по установленным закономерностям, занимают промежуточное положение между методиками [157] и [164]. Обращает внимание тот факт, что при более крепком и жестком первом породном слое кровли рост пучения почвы выработки происходит более интенсивно до 2,06 раз. Такое влияние $\sigma_{сж1}^K$ и E_1^K объясняется самой природой пучения, когда относительно целостный первый слой кровли совместно с угольным пластом выдавливают (в зоне опорного давления) в полость выработки разупрочненный первый породный слой почвы.

Таким образом, на основе сравнительного анализа результатов прогноза перемещений породного контура выработки по нормативным документам и установленным в данной работе закономерностям можно сделать следующие выводы:

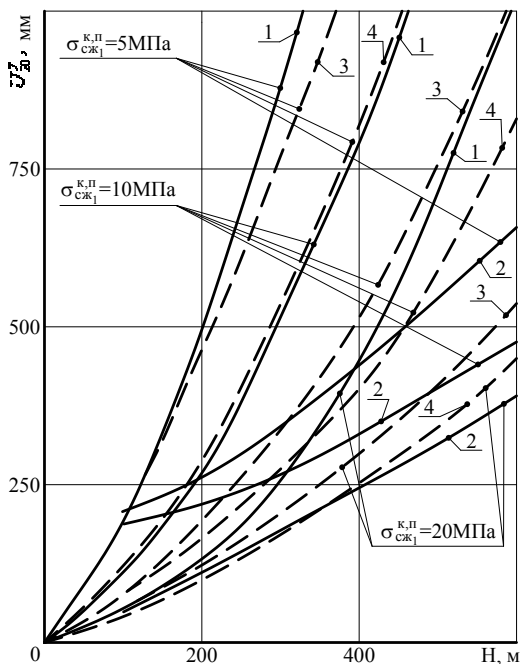


Рис. 12.11. Перемещения почвы выработки (в районе ее центральной оси) по нормативным документам (—) и установленным закономерностям (---): 1 – [175], $t = 1$ год; 2 – [176], $t = 1$ год; 3 – $\sigma_{сж1}^K = 20$ МПа, $E_1^K = 1 \cdot 10^4$ МПа; 4 – $\sigma_{сж1}^K = 5$ МПа, $E_1^K = 0,3 \cdot 10^4$ МПа

– результаты расчетов перемещений контура выработки, особенно ее почвы, имеют существенное различие между собой по нормативным методикам [157] и [164];

– в разрабатываемом алгоритме и нормативных документах [156, 157, 164] имеют место схожие закономерности связи перемещения породного контура с глубиной разработки и сопротивлением сжатию вмещающего породного массива;

– как правило, расчеты по установленным закономерностям дают более широкий интервал перемещений, в который попадают величины $U(x, y)$, вычисленные по нормативным документам; это обусловлено учетом слоистости вмещающего выработку массива со всей гаммой влияния механических характеристик породных слоев в допредельной, предельной и запредельной стадиях их деформирования;

– разрабатываемый алгоритм позволяет прогнозировать эпюру перемещений на всех участках контура выработки, что позволяет оценивать ее эксплуатационную пригодность в соответствии с требованиями правил безопасности и технологическими требованиями функционирования выработки.

В итоге, можно утверждать, что установленные закономерности прогноза перемещений контура пластовой выработки не противоречат нормативным документам [156, 157, 164], а дают более полную картину развития перемещений в зависимости от основных механических характеристик каждого из близлежащих породных слоев.

В плане более полного учета механических характеристик пород представляет интерес сравнение результатов расчета с методом проф. В.В. Виноградова [135]. Здесь можно провести в основном качественное сравнение закономерностей связи перемещений контура выработки с механическими характеристиками окружающего массива, поскольку исходные положения оцениваемых методологий имеют существенные отличия в части учета: слоистости с нарушенными контактами в окрестности выработки; реальной формы выработки взамен ее кругового очертания; реального паспорта крепления выработки с соответствующими особенностями взаимодействия крепи и приконтурного породного массива взамен приложения равномерно распределенной реакции крепи. Тем не менее, закономерности влияния механических характеристик близлежащего породного массива и тенденции развития перемещений с увеличением параметра $\frac{\gamma H}{\sigma_{сж}}$ во мно-

гом схожи. Так, величина остаточной прочности породы оказывает значительное влияние на величину перемещений (рис. 12.12). На этом рисунке приведены перемещения в замке свода выработки, поскольку метод [135] предполагает равномерное распределение перемещений по контуру выра-

ботки. По мере снижения отношения $\frac{\sigma_{сж}^0}{\sigma_{сж}}$ происходит резкое увеличение

перемещений породного контура. Причем, по методу [135] при $\frac{\sigma_{сж}^0}{\sigma_{сж}} = 0,05$ возникает «катастрофическое» развитие перемещений в довольно узком диапазоне $\frac{\gamma H}{\sigma_{сж}} = 0,40...0,55$, что не наблюдается на практике. В установленных закономерностях такого скачка U_9^y не происходит, а имеет место плавный рост перемещений по некоторой степенной зависимости от $\frac{\gamma H}{\sigma_{сж}}$.

Другим существенно влияющим параметром согласно [135] является отношение $\frac{M}{E}$ модуля спада к модулю деформации породы, по которому оценивают степень хрупкости породы при ее разрушении. Общеизвестно, что склонность породы к хрупкому разрушению $\left(\frac{M}{E} \rightarrow \infty\right)$ провоцирует

развитие обширных зон предельного состояния и, как следствие, значительных перемещений породного контура выработки. Только в установленных закономерностях функции

$U_9^y \left(\frac{\gamma H}{\sigma_{сж}}\right)$ возрастают более плавно

(рис. 12.13) без проявления скачка перемещений, как это наблюдается в методе [135].

В целом, результаты сравнительного анализа показывают, что разрабатываемый алгоритм прогноза перемещений контура выработки не противоречит известным геомеханическим закономерностям проявлений горного давления, установленным как экспериментальным [156, 157, 164], так и аналитическим [135] путями. Следовательно, исходные предпосылки разрабатываемого алгоритма выбраны достаточно обоснованно, а их преимущество в сравнении с известными методиками прогноза заключаются в учете:

- реальной структуры углевмещающей породной толщи угольных пластов;

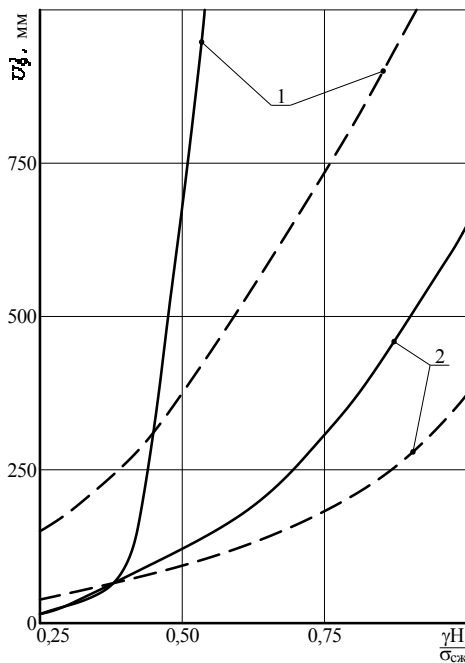


Рис. 12.12. Перемещения в замке свода выработки по методу [135] (—) и установленным закономерностям (---):

$$1 - \frac{\sigma_{сж}^0}{\sigma_{сж}} = 0,05 ; 2 - \frac{\sigma_{сж}^0}{\sigma_{сж}} = 0,20$$

- нарушения сплошности массива по плоскостям напластования;
- реального паспорта крепления пластовой выработки;

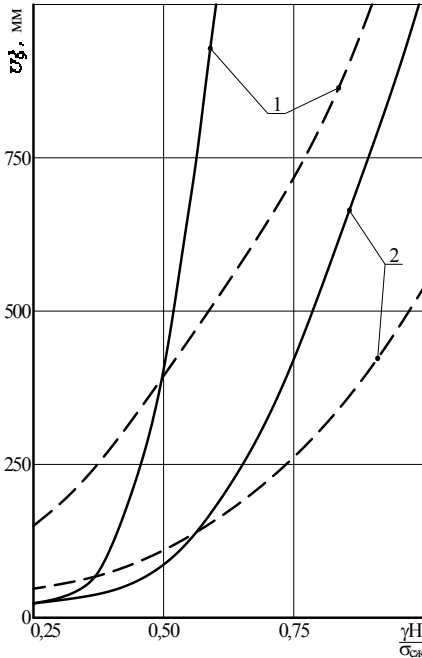


Рис. 12.13. Перемещения в замке свода выработки по методу [135] (—) и установленным закономерностям (---):

$$1 - \frac{M}{E} = 5; \quad 2 - \frac{M}{E} = 0,5$$

- полных диаграмм деформирования каждого из элементов системы «массив-крепь».

Таким образом, перспектива развития численных методов учета реальных структур объектов и полных диаграмм нагружения материалов не вызывает сомнений при условии постоянного накопления экспериментальных данных о поведении углевмещающей слоистой толщи пород не только в допредельной, но и запредельной стадиях состояния, что будет способствовать повышению точности прогноза проявлений горного давления.

12.4. ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПРИГОДНОСТИ ВЫРАБОТКИ

По совокупности результатов, полученных на предыдущих этапах исследований, можно утверждать, что выявлены закономерности развития перемещений на любом участке контура пластовой выработки. Эти закономерности необходимо оценить с практической стороны – безопасной и надежной эксплуатации

выработки по соответствующему комплексу критериев на основе нормативных документов [167, 168] и современных исследований ее устойчивости.

Ранее сформулирована система критериев оценки состояния выработки в общей постановке, теперь необходимо выразить эти критерии в виде системы математических неравенств, отражающих условия надежной и безопасной эксплуатации пластовой выработки, для чего выделено четыре основных позиции.

Первая – устойчивость рамной крепи – предполагает ее работу в податливом режиме на протяжении всего периода эксплуатации выработки. Если вертикальная или боковая податливость рамы исчерпана, ее дальнейший жесткий режим работы не предусматривает развитие сколь-нибудь существенных перемещений контура выработки. В противном случае перемещающийся в полость выработки породный массив вызывает появление в раме

пластических шарниров, ее форма трансформируется в менее устойчивую с необратимыми пластическими деформациями спецпрофиля СВП, а иногда и его разрывом. Следовательно, вертикальные и боковые перемещения рамы не должны превышать ее допустимых норм податливости. За расчетную величину вертикальных и боковых перемещений следует принимать перемещения $U_{4,5}^y$ и $U_{4,5}^x$, поскольку эти точки (№4 и №5) характеризуют участок расположения замков податливости (после осадки) у крепи серии КМП-А3 и поворота удлиненных стоек у крепи серии КШПУ.

Таким образом, условие устойчивости рамной крепи можно записать двумя неравенствами:

$$\left. \begin{aligned} U_{4,5}^y &\leq U^e; \\ U_{4,5}^x &\leq U^b, \end{aligned} \right\} \quad (12.1)$$

где U^e и U^b – допустимая величина вертикальной и боковой податливости рамы.

Вторая – обеспечение условий безопасного движения транспортных средств – предполагает сохранение допустимых зазоров при работе различных транспортных средств (подвижной состав, конвейер, монорельсовая или напочвенная дороги). Здесь необходимо выполнение целого ряда требований, которые разделены на допустимые зазоры по вертикальной δ_i^y и горизонтальной δ_i^x осям выработки после осадки крепи.

При монорельсовом транспорте вертикальный зазор «между днищем сосуда или нижней кромкой перевозимого груза и почвой выработки или расположенным на почве оборудованием» должен составлять не менее 0,4 м после осадки крепи. Поэтому при оценке выбора типового сечения выработки соответствующий зазор δ_1^y до осадки должен удовлетворять условию

$$\delta_1^y - U_1^y - U_9^y - U_{20}^y \geq 0,4 \text{ м.} \quad (12.2)$$

При конвейерном транспорте «расстояние от верхней выступающей части конвейера до верхняка рамы должно быть не менее 0,5 м, а у натяжных и приводных головок – не менее 0,6 м». Тогда данный зазор δ_2^y в типовом сечении выработки до осадки должен быть не менее

$$\delta_2^y - U_1^y - U_9^y - U_{20}^y \geq 0,5 \text{ м (0,6 м).} \quad (12.3)$$

При рельсовом транспорте сохранность рельсового пути и безопасность перевозок обеспечивается при величине пучения почвы не более некоторого допустимого значения, величина которого по существующим исследованиям [56, 155, 177-179] оценивается в интервале 0,2...0,3 м. Следовательно, усло-

вие сохранности рельсового пути имеет вид

$$U_{20}^y \leq 0,3 \text{ м.} \quad (12.4)$$

Также существуют эксплуатационные требования по углу наклона рельсового пути когда превышение (в поперечном сечении выработки) головки одного рельса над другим не должно быть более допустимой нормы δ_3^y во избежание схода с рельс подвижного состава. Такая опасность возникает обычно в двухпутевых выработках, где расположенные по бокам рельсовые пути (или рельсовый путь и конвейер) имеют разную величину поднятия головок рельс из-за переменной по ширине выработки величины пучения. Разница между уровнем головок рельс пути должна быть меньше допустимой δ_3^y и определяется по формуле

$$U_{20}^y (1 - K_{II}) \frac{0,6 + 3l_{кол}}{l_в} \leq \delta_3^y, \quad (12.5)$$

где $l_{кол}$ – ширина колеи рельсового пути;

$l_в$ – ширина выработки по почве в свету;

K_{II} – коэффициент неравномерности пучения по ширине выработки: для типоразмеров выработки с крепью КМП-А3 – $K_{II} = 0,67$ со стороны восстания пласта и $K_{II} = 0,57$ со стороны падения; для типоразмеров с крепью КШПУ – $K_{II} = 0,65$ со стороны восстания и $K_{II} = 0,60$ со стороны падения.

Допустимые горизонтальные зазоры δ_i^x формируют следующие критерии безопасного движения транспорта.

При рельсовом транспорте зазор «между крепью или размещенным в выработках оборудованием и трубопроводами и наиболее выступающей кромкой габарита подвижного состава» не должен быть менее 0,25 м для рамных конструкций крепей. Анализируя типовые сечения выработок с крепями КМП-А3 и КШПУ приходим к выводу, что наименьший зазор между крепью и подвижным составом будет на высоте прохода людей, где следует использовать параметр $U_{4,5}^x$ горизонтального перемещения контура выработки. Тогда по горизонтальной составляющей критерий безопасного движения рельсового транспорта имеет вид

$$\delta_1^x - U_{4,5}^x \geq 0,25 \text{ м,} \quad (12.6)$$

где δ_1^x – минимальный зазор до осадки крепи.

При конвейерном транспорте (независимо от наличия других транспортных средств) допустимый зазор между ним и рамной крепью должен быть не

менее 0,4 м. Обычно верхняя кромка габарита ленточного конвейера располагается примерно посредине между точками №1 и №№4, 5 (№17 и №№13, 14) и здесь (независимо от типов рамных крепей) как правило располагается минимальный зазор. Поэтому, его величина δ_2^x до осадки крепи проверяется по условию

$$\delta_2^x - 0,5(U_{4,5}^x + U_{17}^x) \leq 0,4 \text{ м} \quad (12.7)$$

при расположении конвейера, как со стороны падения, так и со стороны восстания угольного пласта.

При монорельсовом транспорте минимально допустимый зазор «между крепью и наиболее выступающей кромкой габарита подвижного состава или перевозимого груза при скорости его движения до 1 м/с» составляет 0,2 м; «при скоростях движения более 1 м/с зазор увеличивается до 0,3 м». В зависимости от высоты расположения наиболее выступающей кромки габарита допустимый зазор δ_3^x до осадки крепи проверяется по одному из двух условий:

– верхняя часть габарита

$$\delta_3^x - U_{4,5}^x \geq 0,2 \text{ м (0,3 м);} \quad (12.8)$$

– нижняя часть габарита

$$\delta_3^x - 0,5(U_{4,5}^x + U_{17}^x) \geq 0,2 \text{ м (0,3 м).} \quad (12.9)$$

Третья позиция – безопасный проход людей – предполагает зазор «между крепью или размещенным в выработках оборудованием и трубопроводами и наиболее выступающей кромкой габарита подвижного состава» не менее 0,7 м (или 1,0 м в местах посадки людей в пассажирские вагонетки) на высоте от пешеходного настила не менее 1,8 м вне зависимости от вида транспорта. С учетом вертикальных перемещений рамы $U_{4,5}^y$ в зоне прохода людей, вдавливания U_1^y стоек в почву, и пучения почвы в боках выработки $U_{18,22}^y$ определяется вертикальная координата Y_p рамы, соответствующая отметке не менее 1,8 м

$$Y_p \geq 1,8 \text{ м} + U_{18,22}^y + U_{4,5}^y + U_1^y, \quad (12.10)$$

или, с учетом $U_{18,22}^y = K_{\Pi} U_{20}^y$ (значения коэффициента неравномерности пучения почвы по ширине выработки такие же, как и в выражении (12.5)), получаем

$$Y_p \geq 1,8 \text{ м} + K_{\Pi} U_{20}^y + U_{4,5}^y + U_1^y. \quad (12.11)$$

Отталкиваясь от отметки U_p ширина зазора до осадки δ_4^x для прохода людей в этом месте должна удовлетворять условию

$$\delta_4^x - U_{4,5}^x \geq 0,7 \text{ м (1,0 м)}. \quad (12.12)$$

Четвертая позиция – предполагает оценку выбора типового сечения выработки в свету до осадки S_{ce} из расчета, чтобы ее сечение в свету после осадки $S_{ce}^{n.o}$ обеспечивало подачу необходимого объема свежей струи воздуха к местам горных работ. Для этого требуется, чтобы остаточное сечение выработки в свету $S_{ce}^{n.o}$ было не менее расчетной величины S_{ce}^p

$$S_{ce}^{n.o} = S_{ce} - \Delta S_{ce} \geq S_{ce}^p. \quad (12.13)$$

Сформулированные критерии надежной и безопасной эксплуатации выработки являются дополнением к оценке проектного решения по выбору типа-размера поперечного сечения пластовой выработки.

12.5. ПОСТРОЕНИЕ УРАВНЕНИЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭПЮРЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ КОНТУРА ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ

Практическое использование системы критериев надежной и безопасной эксплуатации выработки предполагает определение корреляционных зависимостей для расчета вертикальных и горизонтальных перемещений на тех участках ее контура, которые входят в качестве параметров в вышеупомянутые критерии (12.1)-(12.13).

На предыдущих этапах исследований на базе обширного массива расчетных данных выявлены закономерности связи перемещений контура выработки с ее горно-геологическими и горнотехническими параметрами. Эти закономерности исследованы методами корреляционно-дисперсионного анализа [159-161] и получена система уравнений регрессии для прогноза перемещений контура пластовой выработки, размещенной в слоистом массиве слабых пород, например, шахт Западного Донбасса.

В критериях (12.1)-(12.13) используются значения вертикальных и горизонтальных перемещений U_1^y , $U_{4,5}^y$, $U_{4,5}^x$, U_9^y , U_{17}^x , U_{20}^y , для которых и осуществлено построение уравнений регрессии.

Вдавливание стоек рамной крепи в породы почвы выработки

$$U_1^y = 0,41\Phi_{1,2} \frac{\exp\left(-0,034\sigma_{сж1}^K\right)}{\exp\left(0,4 \cdot 10^{-4} E_1^{\Pi}\right)} \exp\left(-0,016\sigma_{сж2}^K\right) \times$$

$$\times \left[\frac{\sigma_{сж1}^{\Pi}}{\left(\sigma_{сж1}^{\Pi}\right)^0} \right]^{0,55} \left[\left(0,25 - 10^{-2} \sigma_{сж1}^{\Pi}\right) H + \frac{2,3 \cdot 10^{-2} H^2}{\left(\sigma_{сж1}^{\Pi}\right)^{1,75}} \right], \quad (12.14)$$

где $\Phi_1 = 0,32 S_{св}^{0,45}$ – для типовых сечений выработок с крепью КМП-А3;

$\Phi_2 = 0,29 S_{св}^{0,55}$ – для типовых сечений выработок с крепью КШПУ.

Опускание свода выработки в зоне прохода людей

$$U_{4,5}^y = 0,127 \Phi_{3,4} \frac{\exp\left(-0,028 \sigma_{сж2}^K\right) \left(\frac{M_1^K}{E_1^K}\right)^{0,38}}{\exp\left(10^{-4} E_1^K\right)} \times$$

$$\times \left[\frac{\sigma_{сж1}^K}{\left(\sigma_{сж1}^K\right)^0} \right]^{0,9} \left[\left(1,6 - 0,07 \sigma_{сж1}^K\right) H + \frac{7,3 \cdot 10^{-2} H^2}{\left(\sigma_{сж1}^K\right)^{1,5}} \right], \quad (12.15)$$

где $\Phi_3 = 0,206 S_{св}^{0,62}$ – для типовых сечений выработок с крепью КМП-А3;

$\Phi_4 = 0,266 S_{св}^{0,47}$ – для типовых сечений выработок с крепью КШПУ.

Горизонтальное перемещение рамной крепи в зоне прохода людей

$$U_{4,5}^x = \frac{0,052 \Phi_{5,6} \left(\frac{M_1^K}{E_1^K}\right)^{0,31}}{\exp\left[\left(E_1^K - 0,3 E_2^K + 0,2 E_1^{\Pi}\right) \cdot 10^{-4}\right]} \left[\frac{\sigma_{сж1}^K}{\left(\sigma_{сж1}^K\right)^0} \right]^{0,9} \left(\frac{2 \sigma_{сж2}^K}{\sigma_{сж1}^K + \sigma_{сж1}^{\Pi}} \right)^{0,2} \times$$

$$\times \left[\left(1,62 - 0,068 \sigma_{сж1}^K\right) H + \frac{5,1 \cdot 10^{-2} H^2}{\left(0,7 \sigma_{сж1}^K + 0,3 \sigma_{сж1}^{\Pi}\right)^{1,43}} \right], \quad (12.16)$$

где $\Phi_5 = 0,234 S_{св}^{0,57}$ – для типовых сечений выработок с крепью КМП-А3;

$\Phi_6 = 0,25 S_{св}^{0,6}$ – для типовых сечений выработок с крепью КШПУ.

Опускание замка свода выработки

$$U_9^y = 0,055 \Phi_{3,4} \frac{\exp\left(-0,023 \sigma_{сж2}^K\right) \left(\frac{M_1^K}{E_1^K}\right)^{0,26}}{\exp\left[\left(0,8 E_1^K + 0,2 E_2^K\right) \cdot 10^{-4}\right]} \cdot \frac{\sigma_{сж1}^K}{\left(\sigma_{сж1}^K\right)^0} \times$$

$$\times \left[\left(1,5 - 0,06 \sigma_{сж1}^K \right) H + \frac{5,8 \cdot 10^{-2} H^2}{\left(0,85 \sigma_{сж1}^K + 0,15 \sigma_{сж2}^K \right)^{1,5}} \right] \ln \left[\frac{\sigma_{сж2}^K}{\left(\sigma_{сж2}^K \right)^0} + 8,7 \right]. \quad (12.17)$$

Горизонтальное перемещение опор стоек рамной крепи

$$U_{17}^x = 0,12 \Phi_{5,7} \frac{\left(\frac{\sigma_{сж1}^K}{\sigma_{сж1}^\Pi} \right)^{0,22} \left(\frac{M_1^\Pi}{E_1^\Pi} \right)^{0,27}}{\exp \left[\left(E_1^\Pi - 0,3 E_1^K \right) \cdot 10^{-4} \right]} \cdot \left[\frac{\sigma_{сж1}^\Pi}{\left(\sigma_{сж1}^\Pi \right)^0} \right]^{0,7} \times \\ \times \left[\left(1,45 - 0,055 \sigma_{сж1}^\Pi \right) H + \frac{4,58 \cdot 10^{-2} H^2}{\left(\sigma_{сж1}^\Pi \right)^{1,3}} \left(\frac{E_1^K}{M_1^K} \right)^{0,16} \right], \quad (12.18)$$

где $\Phi_7 = 0,24 S_{св}^{0,69}$ – для типовых сечений выработок с крепью КШПУ.

Пучение почвы по середине ширины выработки

$$U_{20}^y = \frac{0,049 \Phi_8 \left(\frac{M_1^\Pi}{E_1^\Pi} \right)^{0,35}}{\exp \left[\left(0,9 E_1^\Pi - 0,25 E_1^K \right) \cdot 10^{-4} \right]} \cdot \left[\frac{\sigma_{сж1}^\Pi}{\left(\sigma_{сж1}^\Pi \right)^0} \right]^{1,1} \times \\ \times \left\{ \left[1,37 - 0,048 \left(1,1 \sigma_{сж1}^\Pi - 0,32 \sigma_{сж1}^K \right) \right] H + \frac{5,2 \cdot 10^{-2} H^2}{\left(\sigma_{сж1}^\Pi - 0,1 \sigma_{сж1}^K \right)^{1,62}} \right\}, \quad (12.19)$$

где $\Phi_8 = 0,152 S_{св}^{0,74}$ – функция, постоянная для обеих серий крепей: КМП-А3 и КШПУ.

В выражениях (12.14)-(12.19) механические характеристики породных слоев подставляются в МПа, глубина расположения выработки – в метрах, площадь ее поперечного сечения – в квадратных метрах. Результат вычисления перемещений имеет размерность в миллиметрах.

Величина потери сечения $\frac{\Delta S_{св}}{S_{св}}$ выработки в процессе осадки крепи определяется в процентах по выражениям:

– для типовых сечений выработок с крепью КМП-А3

$$\frac{\Delta S_{св}}{S_{св}} = S_{св}^{-0,5} \left(1,04 U_9^y + 1,51 U_{4,5}^x + 0,84 U_{20}^y + 1,29 U_1^y \right); \quad (12.20)$$

– для типовых сечений выработок с крепью КШПУ

$$\frac{\Delta S_{св}}{S_{св}} = S_{св}^{-0,5} \left(0,93U_9^y + 1,46U_{4,5}^x + 0,52U_{17}^x + 0,69U_{20}^y + 1,09U_1^y \right). \quad (12.21)$$

Зависимости (5.14)-(5.21) совместно с критериями (12.1)-(12.13) позволяют оценить надежность и безопасность эксплуатации предусмотренного проектом конкретного типоразмера выработки после осадки рамной податливой крепи из спецпрофиля СВП.

12.6. АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ПРОЕКТНОГО РЕШЕНИЯ ПО ВЫБОРУ ТИПОВОГО СЕЧЕНИЯ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ

Порядок расчета перемещений контура выработки, сравнения результатов с соответствующими критериями и оценка предусмотренного проектом типового сечения пластовой выработки предполагает выполнение ряда последовательных операций.

1. Определяются исходные горно-геологические данные размещения пластовой выработки в слоистом породном массиве.

Глубина расположения выработки H выбирается по максимальной отметке на плане горных работ для повышения надежности результатов прогноза. При наличии геологических нарушений в окрестности проводимой выработки расчетная глубина разработки определяется по методикам [156, 157, 164].

Механические характеристики близлежащих породных слоев (первый и второй в кровле и первый слой в почве пласта) уточняются по данным геологической службы шахты с пополнением отсутствующей информации из литературных источников, например, для Западного Донбасса [145, 146, 155, 166]. Расчетная прочность пород на сжатие определяется с учетом ослабляющих факторов по нормативным методикам [156, 157, 164]. Механические характеристики запредельного состояния породных слоев в данных геологической службы шахты, как правило, отсутствуют. Поэтому, на основе исследований [135, 140, 145, 146, 166] рекомендуются следующие расчетные значения для условий слабых пород Западного Донбасса:

– остаточная прочность на сжатие $\frac{(\sigma_{сж_i}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,П}}$: песчаный сланец – 0,1; песчано-глинистый сланец – 0,15; глинистый сланец – 0,2;

– отношение модуля спада к модулю деформации $\frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}}$: песчаный сланец – 2...3; песчано-глинистый сланец – 1...2; глинистый сланец – 0,5...1.

2. Определяются исходные горнотехнические параметры выработки в соответствии с ее назначением по факторам транспорта и вентиляции. В результате по нормативным методикам выбирается проектное типовое сечение выработки [148, 149] с площадью в свету до $S_{св}$ и после $S_{св}^{n,o}$ осадки рамной крепи.

3. Выполняется расчет прогнозируемых перемещений проектного контура выработки $U_i^{x,y}$ по формулам (12.14)-(12.19) и потери ее сечения в свету по формулам (12.20) или (12.21).

4. Проверяется принятый проектом типоразмер сечения по критериям устойчивости рамной крепи, безопасности транспорта и прохода людей (12.1)-(12.12). Проверяется сечение выработки в свету после осадки по критерию (12.13) требуемого расхода воздуха.

5. Оценивается степень выполнения всех критериев.

При полном удовлетворении критериев (12.1)-(12.13) выбранное проектом типовое сечение пригодно к эксплуатации без проведения каких-либо дополнительных мероприятий.

При частичном невыполнении некоторых условий надежного и безопасного функционирования выработки следует оценить возможность усиления рамной крепи (например, установкой системы анкеров, увязанных с рамой в единую конструкцию) или применения конструкций рамной крепи с более высокими значениями допустимой податливости и несущей способности.

6. При невыполнении большинства условий (12.1)-(12.13) следует выполнить технико-экономический анализ сравнения двух вариантов:

– увеличение проектного типового сечения выработки с дополнительными затратами на ее проведение и крепление;

– затраты на проведение специальных мероприятий: анкерное упрочнение приконтурного массива по наиболее опасным участкам контура выработки или всего ее периметра; тампонаж закрепного пространства; установка обратного свода рамы по почве как самостоятельный вид крепи, так и в сочетании с анкерным упрочнением; возведение металлобетонной или кольцевой типов крепей с тампонажом или без него; периодическая подрывка почвы; перекрепление выработки с выпуском породы в кровле и боках и другие способы повышения устойчивости выработки.

7. Предлагаемый алгоритм позволяет уже на стадии проектирования оперативно спрогнозировать эксплуатационное состояние пластовой выработки, пройденной в слоистом массиве слабых пород, и заложить в проект (при необходимости) выполнение специальных мероприятий по повышению ее устойчивости.

ВЫВОДЫ

1. Влияние площади поперечного сечения выработки в свету имеет степенную закономерность воздействия на перемещения всех участков ее контура (с различным показателем степени на разных участках контура) для обоих типоразмеров: с крепью КМП-А3 и крепью КШПУ. Этот факт отличается от принципов прогноза перемещений в нормативных методиках, где S_{ce} учитывается линейно возрастающим поправочным коэффициентом, а тип крепи (КМП-А3 или КШПУ) единым коэффициентом ее работоспособности на все горно-геологические условия поддержания выработки.

2. С увеличением площади поперечного сечения выработки в свету выявлены отличия в интенсивности роста перемещений ее контура для двух групп типоразмеров – с крепью КМП-А3 и крепью КШПУ:

– в кровле выработок с крепью КШПУ величина и интенсивность роста вертикальных перемещений несколько ниже (до 18,7%) за счет уменьшенного (по сравнению с КМП-А3) радиуса свода верхняка и криволинейной части стойки;

– в боках выработки горизонтальные перемещения в зоне прохода людей и особенно в опорах стоек рамы у крепи КШПУ существенно выше (до 44,3%) за счет увеличенной высоты выработки и высоты расположения пластического шарнира в раме, вокруг которого происходит поворот удлинненной стойки;

– максимумы перемещений пород почвы несущественно отличаются для разных типов крепей в силу примерного равенства ширин выработки по почве для типоразмеров сечений с крепью КМП-А3 и крепью КШПУ;

– вдавливание стоек рамы в почву у крепи КШПУ до 20,6% выше за счет пониженного сопротивления внедрению стойки из-за ее менее интенсивного изгиба в полость выработки.

3. Геомеханические параметры системы «массив-крепь» влияют на перемещения различных участков контура выработки с закономерностями, не зависящими от ее типового сечения, что позволяет произвести учет типоразмера выработки в виде функций – сомножителей к стабильным функциям связи перемещений $U(x, y)$ с параметрами системы.

4. Выявлена высокая стабильность (отклонения до 10,6%) величины относительной потери сечения от типоразмера выработки, что объясняется компенсацией прироста (убывания) перемещений контура штрека при изменении его площади поперечного сечения в свету S_{ce} . Поэтому величина относительной потери сечения фактически определяется только глубиной расположения выработки и механическими характеристиками близлежащих породных слоев углевмещающей толщи.

5. Оценка достоверности расчета напряженно-деформированного состояния системы «массив-крепь» дала вполне удовлетворительные результаты: во-первых, закономерности развития перемещений контура выработки не

противоречат известным геомеханическим тенденциям, установленным как экспериментальными, так и аналитическими исследованиями; во-вторых, благодаря учету всех основных механических характеристик элементов системы разработанный алгоритм обладает более высокой общностью прогноза перемещений контура выработки.

6. Выделены четыре основных позиции надежной и безопасной эксплуатации выработки в соответствии с требованиями нормативных документов: устойчивость рамной крепи; условия безопасного движения транспортных средств; условия безопасного прохода людей; надежная вентиляция участков шахтного поля. Для каждой из позиций записаны системы критериев, руководствуясь которыми возможно комплексно оценить выбранное проектом типовое сечение пластовой выработки в конкретных горно-геологических и горнотехнических условиях.

7. На базе методов корреляционно-дисперсионного анализа получена система уравнений регрессии для прогноза эпюры перемещений контура выработки, что в сочетании с критериями надежной и безопасной ее эксплуатации позволяет в замкнутом виде уже на стадии проектирования оперативно спрогнозировать состояние выработки по основным параметрам ее функционирования в слоистом массиве слабых пород и заложить в проект (при необходимости) выполнение специальных мероприятий по повышению ее устойчивости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе изложено новое решение научно-технической проблемы обеспечения надежной и безопасной эксплуатации пластовых горных выработок шахт Западного Донбасса за счет повышения достоверности прогноза проявлений горного давления неоднородного углевмещающего массива слабых пород по всему контуру пластовой выработки с учетом полных диаграмм деформирования каждого из элементов системы «массив-крепь».

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Обоснование геомеханической модели пластовых подготовительных выработок, расположенных в слоистом массиве слабых пород, проведено по комплексу основных горно-геологических и горнотехнических факторов, что позволило максимально адекватно реальным условиям смоделировать процесс сдвижения неоднородной слоистой углевмещающей толщи в полость выработки:

– размеры модели выбраны с учетом незначительного влияния выработки на граничных поверхностях, где выполняются исходные негидростатические условия распределения вертикальных и горизонтальных компонент напряжений;

– установлено, что при слабых связях между смежными породными слоями действующие касательные напряжения их разрушают и слои деформируются по плоскостям напластования как несвязная структура в окрестности выработки; этот фактор существенно изменяет НДС системы и учтен в разработанной модели;

– для условий Западного Донбасса по стратиграфическим колонкам угольных пластов построено три наиболее характерных структуры углевмещающей толщи, анализ НДС которых позволил с достаточной точностью обосновать единую усредненную структуру, погрешность которой не превышает 10% во всем диапазоне изменения геомеханических параметров вмещающего массива;

– оценено влияние деформационных характеристик близлежащих к пластовой выработке породных слоев на НДС системы «массив-крепь», что позволило установить: несмотря на различные соотношения деформационных характеристик близлежащих слоев в кровле и почве размеры зон предельного состояния (в основном от действия σ_x и σ_y) достаточно стабильны и охватывают два породных слоя в кровле и один в почве; в боках выработки наблюдается ярко выраженная область опорного давления, размеры которой определяются в основном глубиной разработки и прочностными характеристиками близлежащих породных слоев – снижение σ происходит в случае залегания в кровле хотя бы одного слоя повышенной жесткости;

– проведенное тестирование модели на предмет соответствия результатов расчета классическим представлениям о механизме сдвижения слоистого массива в окрестности выработки подтвердило целесообразность ее ис-

пользования для изучения геомеханических процессов.

2. Во вмещающей пластовую выработку слоистой толще слабых пород переход в предельное и запредельное состояния наступает в различных областях и элементах системы. Поэтому для повышения адекватности геомеханической модели НДС каждого ее элемента должно рассчитываться по полной диаграмме деформирования с учетом особенностей конкретного материала, что впервые выполнено для условий Западного Донбасса и позволило глубже раскрыть механизм развития геомеханических процессов в окрестности выработки.

3. Установлены отдельные закономерности влияния прочностных и деформационных характеристик каждого из близлежащих породных слоев на изменение поля напряжений и перемещений с ростом глубины расположения пластовой выработки. Определяющим фактором является вид состояния и размеры его области в близлежащих породных слоях и угольном пласте (допредельное, предельное, запредельное) при конкретной глубине разработки:

– при повышенных прочностных характеристиках породных слоев их частично допредельное состояние предопределяет связь напряжений и перемещений с параметром H , близкую к линейной; вариация модуля деформации слоев в интервале $E_i^{K,II} = (0,3...1) \cdot 10^4$ МПа изменяет напряжения до 55%, а перемещения контура выработки до 131%;

– при пониженных прочностных характеристиках породных слоев зависимость НДС массива от параметра H становится нелинейной с наступлением предельного состояния хотя бы одного из слоев; в запредельном состоянии интенсивность роста перемещений контура выработки существенно увеличивается, а напряжений – уменьшается; при этом модули деформации слоев несущественно влияют на поле напряжений, а смещения контура выработки, особенно в ее почве, могут изменяться до 2,5 раз.

4. Выявлено, что относительная независимость деформирования породных слоев при их проскальзывании относительно друг друга в окрестности выработки порождает высокую степень независимости поля напряжений отдельного породного слоя от вида состояния соседних слоев:

– слои пониженной прочности с ростом H переходят в предельное и запредельное состояние практически независимо от прочностных характеристик соседних более крепких породных слоев

– поле напряжений в более крепких породных слоях в малой степени зависит от перехода соседнего слоя в предельное и запредельное состояние;

– поле напряжений в угольном пласте, втором слое почвы и третьем слое кровли достаточно стабильно по отношению к виду состояния какого-либо близлежащего породного слоя.

5. Установленные закономерности развития эпюры перемещений по контуру пластовой выработки, сооружаемой в слоистом массиве слабых пород, определяют разную связь смещений отдельных участков контура с геомеханическими параметрами:

– в кровле происходит выполаживание свода рамы (снижающее ее несущую способность) со стабильным отношением 0,64...0,71 вертикальных перемещений в зоне прохода людей в сравнении с опусканием замка свода; здесь существенное влияние (более 10%) оказывают механические характеристики первого и второго породных слоев кровли: $E_{1,2}^K$, M_1^K / E_1^K , $\sigma_{сж1,2}^K$,

$$\left(\sigma_{сж1,2}^K\right)^0 / \sigma_{сж1,2}^K ;$$

– в боках выработки происходит изгиб стоек рамной крепи, снижающий ее устойчивость, на величину которого оказывают существенное влияние механические характеристики не только первого и второго породных слоев кровли, но также и первого слоя почвы: $E_{1,2}^{K,П}$, $M_1^{K,П} / E_1^{K,П}$, $\sigma_{сж1,2}^{K,П}$,

$$\left(\sigma_{сж1,2}^{K,П}\right)^0 / \sigma_{сж1,2}^{K,П} ;$$

опережающее сближение опор стоек рамы обусловлено действием «эффекта штампа», когда в условиях залегания более жесткого и менее разупрочненного первого породного слоя кровли, он под воздействием опорного давления в боках выработки интенсифицирует выдавливание пород почвы в полость выработки;

– эпюра пучения почвы выработки имеет асимметрию в сторону восстания угольного пласта таким образом, что в зоне прохода людей в этой стороне выработки поднятие почвы составляет 0,65...0,67 от максимального (в центральной части выработки), а в зоне прохода людей со стороны падения пласта – 0,57...0,60 от максимального вне зависимости от сочетания геомеханических факторов; на величину пучения почвы существенное влияние оказывают только механические характеристики первых породных слоев кровли и почвы: $E_1^{K,П}$, $M_1^{П} / E_1^{П}$, $\sigma_{сж1}^{K,П}$, $\left(\sigma_{сж1}^{П}\right)^0 / \sigma_{сж1}^{П}$;

– общая величина поднятия почвы выработки включает две составляющие, отличающиеся между собой механизмом развития перемещений: собственно пучение – перемещение пород почвы в полость выработки под воздействием опорного давления в ее боках и разгруженной зоны непосредственно под выработкой; вдавливание опор стоек рамной крепи, обусловленное совместным действием вертикальной нагрузки на крепь и разупрочняющимися породами почвы под опорами стоек; величина вдавливания определяется механическими характеристиками: $E_1^{П}$, $\sigma_{сж1,2}^{K,П}$, $\left(\sigma_{сж1}^{П}\right)^0 / \sigma_{сж1}^{П}$.

6. Анализ закономерностей развития перемещений контура выработки и НДС ее крепи позволил выявить область горно-геологических условий, когда возможно сохранение эксплуатационного состояния выработки с помощью ресурсосберегающих технологий усиления рамы системой анкеров: при $H \leq 400$ м $\sigma_{сж1}^{K,П} = 10...15$ МПа; при 400 м $< H \leq 600$ м $\sigma_{сж1}^{K,П} > 15$ МПа. Такая

возможность в указанных условиях обусловлена относительно умеренными перемещениями контура выработки и ограниченными областями предельного и запредельного состояния массива. Для частичной компенсации перемещений на опасных (с точки зрения эксплуатационных норм и правил безопасности) участках контура выработки целесообразно применять податливые трубчатые анкера ТА-2 и анкера с эластичным запасом, развивающие высокую реакцию сопротивления даже в разупрочненных слабых породах.

7. Влияние площади поперечного сечения выработки в свету S_{ce} имеет индивидуальные степенные закономерности воздействия на перемещения различных участков ее контура для обоих типоразмеров – с крепью КМП-А3 и крепью КШПУ. Этот результат отличается от принципов усреднения в нормативных методиках на все горно-геологические условия поддержания выработок. Наряду с этим одинаковые геомеханические факторы поддержания выработок стабилизируют величину ее относительной потери сечения независимо от типоразмера и вида применяемой крепи – КМП-А3 или КШПУ.

8. Оценка достоверности расчета НДС системы «массив-крепь» дала удовлетворительные результаты:

- закономерности развития перемещений контура выработки не противоречат известным геомеханическим тенденциям, установленным как экспериментальными, так и аналитическими исследованиями;

- благодаря учету всех основных механических характеристик по полной диаграмме деформирования каждого из элементов системы установленные закономерности обладают более высокой общностью прогноза.

9. Выделены четыре основных позиции надежной и безопасной эксплуатации выработки в соответствии с требованиями нормативных документов: устойчивость рамной крепи, условия безопасного прохода людей, условия безопасного движения транспортных средств, надежная вентиляция участков шахтного поля. Для каждой из позиций сформулированы системы критериев и получены уравнения регрессии входящих туда параметров, что позволяет в замкнутом виде уже на стадии проектирования оперативно спрогнозировать комплексное состояние пластовой выработки по основным условиям ее функционирования в слоистом массиве слабых пород и заложить в проект (при необходимости) выполнение специальных мероприятий по повышению устойчивости выработки, например, упрочнение боковых пород анкерами, твердеющими смесями и др.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Феннер, Р. Исследование горного давления [Текст] / Р. Феннер // Вопросы теории горного давления. – М.: Госгортехиздат, 1961. – С. 5-58.
2. Лабасс, А. Давление горных пород в угольных шахтах [Текст] / А. Лабасс // Вопросы горного давления. – М.: Госгортехиздат, 1961. – С. 59-164.
3. Руппенейт, К.В. Некоторые вопросы механики горных пород [Текст] / К.В. Руппенейт. – М.: Углетехиздат, 1954. – 384 с.
4. Глушко, В.Т. Определение механических характеристик разрушенных горных пород в лабораторных условиях [Текст] / В.Т. Глушко, И.М. Ваганов, Г.Т. Криничанский // Уголь Украины. – 1974. – №5. – С. 22-24.
5. Ардашев, К.А. Упрощенный способ испытаний на сжатие образцов горных пород при деформациях за пределом прочности [Текст] / К.А. Ардашев, Б.В. Матвеев // Физико-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. – 1978. – №2. – С. 107-111.
6. Ставрогин, А.Н. Влияние скорости деформирования на запредельные характеристики горных пород [Текст] / А.Н. Ставрогин, Б.Г. Тарасов, Е.Д. Певзнер // Физико-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. – 1982. – №5. – С. 8-15.
7. Немчин, Н.П. Об учете неупругого разрыхления в теории горного давления [Текст] / Н.П. Немчин // Физико-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. – 1971. – №3. – С. 13-18.
8. Литвинский, Г.Г. Шахтные наблюдения за развитием зоны неупругих деформаций вокруг капитальных выработок [Текст] / Г.Г. Литвинский, Е.Б. Дружко // Проектирование и строительство угольных предприятий. – 1970. – №3. – С. 34-38.
9. Линьков, А.М. Об учете запредельных деформаций при решении задач геомеханики [Текст]: сб. науч. тр. ВНИМИ. – 1977. – Вып. 103. – С. 71-76.
10. Баклашов, И.В. Оценка устойчивости горных выработок [Текст] / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия // Шахтное строительство. – 1978. – №12. – С. 13-17.
11. Глушко, В.Т. Исследование деформаций горных выработок с учетом изменения прочностных параметров пород в неупругой зоне [Текст] / В.Т. Глушко, В.В. Виноградов, Д.Ф. Тагобицкая // Физико-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. – 1972. – №3. – С.16-20.
12. Глушко, В.Т. Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления [Текст] / В.Т. Глушко, В.В. Виноградов. – М.: Недра, 1982. – 192 с.
13. Протосеня, А.Г. Упруго-пластическое распределение напряжений возле круглого отверстия для пластически неоднородной среды [Текст] / А.Г. Протосеня // Прикладная механика. – 1972. – Т. 8., Вып.2. – С. 73-78.
14. Протосеня, А.Г. О методике учета разрыхления пород при прогнозировании смещений вокруг горных выработок [Текст] / А.Г. Протосеня // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1977. – №11. – С. 14-17.

15. Протосеня, А.Г. К учету ниспадающей ветви при расчете напряженно-деформированного состояния пород вокруг горных выработок [Текст] / А.Г. Протосеня // Разработка соляных месторождений. – Пермь, 1980. – С. 99-106.
16. Сажин, В.С. Определение области неупругих деформаций с учетом изменения сцепления пород [Текст] / В.С. Сажин // Физико-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. – 1967. – №6. – С. 93-95.
17. Алимжанов, М.Т. Об одной модели работы горного массива вблизи выработок [Текст] / М.Т. Алимжанов // Вопросы механики горных пород. – М.: Недра, 1971. – С. 18-21.
18. Шемякин, Е.И. Две задачи механики горных пород, связанные с освоением глубоких месторождений руды и угля [Текст] / Е.И. Шемякин // Физико-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. – 1975. – №6. – С. 29-45.
19. Гришко Г.И. Прогнозирование и расчет проявлений горного давления [Текст] / Г.И. Гришко, В.В. Власенко и др. – Новосибирск: Наука, 1980. – 159 с.
20. Бондаренко, В.И. Научные основы физико-химического закрепления слабых водонасыщенных пород вокруг горных выработок [Текст]: дис. д-ра техн. наук / В.И. Бондаренко. – Днепропетровск, 1989. – 392 с.
21. Парчевский, Л.Я. Теоретические предпосылки и постановка задач расчета устойчивости выработок [Текст] / Л.Я. Парчевский, А.М. Симанович // Исследования проявлений горного давления на глубоких горизонтах шахт. – Л.: Изд. ВНИМИ, 1971. – С. 95-99.
22. Розовский, М.И. Оценка надежности деформированного состояния горных пород при случайных нагрузках [Текст] / М.И. Розовский, О.И. Шакалова // Проблемы механики горных пород. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1971. – С. 340-343.
23. Шейнин, В.И. Некоторые статистические задачи расчета подземных сооружений [Текст] / В.И. Шейнин, К.В. Руппенейт. – М.: Недра, 1969. – 153 с.
24. Скобенко, А.В. Обоснование параметров рамной крепи капитальных и подготовительных выработок угольных шахт на основе вероятностно-статистических моделей [Текст]: дис. канд. техн. наук / А.В. Скобенко. – Днепропетровск, 2000. – 132 с.
25. Миренков, В.Е. О некоторых соотношениях трехмерной задачи теории упругости [Текст] / В.Е. Миренков // Вопросы горного давления. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1980. – С. 59-63.
26. Миренков, В.Е. О деформировании пространства с разрезами [Текст] / В.Е. Миренков // Диагностика напряженного состояния породных массивов. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1980. – С. 14-20.
27. Миренков, В.Е. Определение напряженно-деформированного состояния в пространстве с цилиндрической выработкой [Текст] / В.Е. Миренков // Горное давление в капитальных и подготовительных выработках. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1981. – С. 66-70.
28. Бакланова, Г.И. Пространственная задача об устойчивости горных выработок при упругопластических деформациях [Текст] / Г.И. Бакланова // Прикладная механика. – 1980. – Т. 16., №7. – С. 35-40.

29. Кулиев, Г.Г. Пространственная форма потери устойчивости упругого равновесия в окрестности горизонтальных горных выработок некругового поперечного сечения [Текст] / Г.Г. Кулиев, Э.С. Махмудов // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1982. – №6. – С. 59-65.
30. Гузь, А.Н. Основы теории устойчивости горных выработок [Текст] / А.Н. Гузь. – К.: Наукова думка, 1977. – 228 с.
31. Алимжанов, М.Т. Устойчивость равновесия тел и задачи механики горных пород [Текст] / М.Т. Алимжанов. – Алма-Ата: Наука, 1982. – 270 с.
32. Амусин, Б.З. Расчет проявлений горного давления на сопряжениях капитальных горных выработок [Текст] / Б.З. Амусин // Шахтное строительство. – 1979. – №5. – С. 7-11.
33. Подильчук, Ю.Н. Пространственные задачи механики горных пород [Текст] / Ю.И. Подильчук. – К.: Наукова думка, 1983. – 160 с.
34. Векуа, И.Н. Пространственная задача теории упругости для эллипсоида вращения и эллипсоидальной полости [Текст] / И.Н. Векуа // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1967. – №3. – С. 118-124.
35. Алимжанов, М.Т., Гордон В.И. Об устойчивости подземной полости сферической формы [Текст] / М.Т. Алимжанов, В.И. Гордон // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1980. – №7. – С. 6-8.
36. Алимжанов, М.Т., Гордон В.И. Исследование устойчивости глубокой подземной полости сферической формы [Текст] / М.Т. Алимжанов, В.И. Гордон // Устойчивость и крепление горных выработок. – Л.: ЛГИ. – 1980. – №6. – С. 9-31.
37. Подильчук, Ю.Н., Ткаченко В.Ф. Напряжения в ненарушенных горизонтальных и наклонных пластах [Текст] / Ю.Н. Подильчук, В.Ф. Ткаченко // Физико-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. – 1980. – №5. – С. 23-31.
38. Новикова, Л.В. Теоретические основы и методы расчета параметров средств крепления и охраны подготовительных выработок марганцеворудных шахт [Текст]: дис. д-ра техн. наук / Л.В. Новикова. – Днепропетровск, 1989. – 361 с.
39. Боган, Ю.А. О распределении напряжений в сильно анизотропном полупространстве с цилиндрической полостью [Текст] / Ю.А. Боган // Физико-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. – 1982. – №6. – С. 19-23.
40. Конопелько, Е.В. Осесимметричная деформация многослойного упругоизотропного полупространства с цилиндрической выемкой, подкрепленной жестким включением [Текст] / Е.В. Конопелько // Проблемы механики подземных сооружений. – Л.: ЛГИ, 1978. – С. 100-103.
41. Джегер, Ч. Механика горных пород и инженерные сооружения [Текст] / М. Джегер. – М.: Мир, 1975. – 540 с.
42. Фотиева, Н.Н. Расчет обделок тоннелей некруглого поперечного сечения [Текст] / Н.Н. Фотиева. – М.: Стройиздат, 1974. – 243 с.
43. Баклашов, И.В. Механика подземных сооружений и конструкции крепей [Текст] / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия. – М.: Недра, 1984. – 415 с.

44. Булычев, И.С. Методика расчета многослойных обделок взаимовлияющих параллельных тоннелей, сооружаемых в подработанном грунтовым массиве [Текст] / И.С. Булычев, С.В. Анциферов, А.К. Петренко // Механика подземных сооружений. – Тула: ТулГТУ. – 1995. – С. 14-23.

45. Евтушенко, Б.В. Расчет крепи горной выработки круглого сечения в массиве пород с переменным вдоль радиуса выработки модулем упругости [Текст] / Б.В. Евтушенко // Механика подземных сооружений. – Тула: ТулГТУ. – 1995. – С. 40-51.

46. Курленя, М.В. Расчет напряженного состояния массива пород с использованием натуральных данных о деформировании [Текст] / М.В. Курленя, В.Е. Миренков, А.В. Шутов // Физико-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. – 1999. – №3. – С. 27-35.

47. Бушманова, О.П. Напряженное состояние породного массива вокруг выработки при локализации деформаций сдвига [Текст] / О.П. Бушманова, А.Ф. Ревуженко // Физико-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. – 2002. – №4. – С. 18-26.

48. Парчевский, Л.Я. Методы теории случайных функций при расчетах устойчивости подземных выработок с рамными креплениями [Текст] / Л.Я. Парчевский, С.В. Бегичев // Материалы межд. симпоз. «Неделя горника». – М.: МГТУ, 2002. – С. 166-171.

49. Протосеня, А.Г. Расчет нагрузок на обделки тоннелей метрополитенов, сооружаемых в физически нелинейных грунтовых массивах [Текст] / А.Г. Протосеня, М.О. Лебедев // Физико-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. – 2002. – №5. – С. 10-16.

50. Протосеня, А.Г. Расчет нагрузок на крепь горных выработок и тоннелей, сооружаемых в физически нелинейно-пластических массивах [Текст] / А.Г. Протосеня, М.О. Лебедев // Известия вузов. Горный журнал. – 2003. – №6. – С. 92-96.

51. Саммаль, А.С. Оценка устойчивости пород вокруг горных выработок при тектонических и сейсмических воздействиях [Текст] / А.С. Саммаль, Н.Н. Фотиева, П.В. Деев // Материалы межд. симпоз. «Неделя горняка». – М.: МГТУ. – 2002. – С. 186-189.

52. Гаркушин, П.К. Устойчивость кровли камер при разработке калийных месторождений [Текст] / П.К. Гаркушин, Ю.И. Разоренов, С.Г. Евсегнеев // Уголь Украины. – №2. – С. 9-11.

53. Миренков, В.Е. Метод расчета деформирования пород около выработки в нелинейной постановке [Текст] / В.Е. Миренков // Известия вузов. Горный журнал. – 2003. – №6. – С. 84-87.

54. Миренков, В.Е. Определение связи компонент напряжений и смещений на границе массива пород [Текст] / В.Е. Миренков // Физико-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. – 2004. – №1. – С. 42-49.

55. Сухарникова, В.А. Напряженное состояние пород вблизи горных выработок [Текст] / В.А. Сухарникова, А.А. Привалов, А.В. Евстратова // Материалы межд. симпоз. «Неделя горняка». – М.: МГТУ. – 2003. – С. 110-112.

56. Шестаков, Г.П. Влияние структурно-геологических особенностей на определение напряжений и устойчивости почвы горных выработок шахт Донбасса [Текст]: сб. научн. тр. Приложение результатов исследований полей напряжений к решению задач горного дела и инженерной геологии. – Апатиты: гор. Типография. – 1985. – С.100-104.

57. Оресте, П.П. Проектирование радиальной анкерной крепи в туннелях [Текст] / П.П. Оресте // Физико-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. – 2002. – №5. – С. 72-83.

58. Черданцев, Н.В. Устойчивость сопряжения двух горных выработок сводчатой формы [Текст] / Н.В. Черданцев, В.Ю. Изаксон // Физико-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. – 2004. – №2. – С. 48-51.

59. Черданцев, Н.В. Граничные интегральные уравнения в задачах механики подземных сооружений [Текст] / Н.В. Черданцев, В.А. Шаламанов // Известия вузов. Горный журнал. – 2004. – №4. – С. 50-54.

60. Управление напряженным состоянием породного массива и устойчивостью горных выработок [Текст] / В.А. Полухин, С.А. Калоеров, Ю.Б. Грядущий, Е.С. Горянская. – Донецк.: Юго-Восток, 2002. – 302 с.

61. Калоеров, С.А. Определение напряженного состояния геомассива вокруг горных выработок (тоннелей) [Текст] / С.А. Калоеров, В.А. Полухин // Уголь. – 2004. – №5. – С. 30-32.

62. Симанович, Г.А. Взаимодействие породного массива с трубчатыми штангами и разработка метода расчета их параметров [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Г.А. Симанович. – Днепропетровск, 1982. – 197 с.

63. Поротников, В.В. Обоснование параметров упрочнения трубчатыми анкерами слабых приконтурных пород подземных выработок [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / В.В. Поротников. – Днепропетровск, 2006. – 189 с.

64. Теория и практика применения трубчатой анкерной крепи [Текст] / В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, В.В. Поротников. – Днепропетровск: Системные технологии, 2005. – 321 с.

65. Ковалевская, И.А. Геомеханика взаимодействия беззамковой анкерной крепи с породным массивом [Текст] / И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович. – Днепропетровск: Системные технологии, 2006. – 104 с.

66. Ковалевская, И.А. Взаимодействие анкерной и комбинированной крепей с породным массивом и разработка методов расчета их рациональных параметров [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / И.А. Ковалевская. – Днепропетровск, 1995. – 200 с.

67. Ковалевская, И.А. Геомеханика взаимодействия элементов системы «горный массив-упрочненные породы-крепь подземных выработок» [Текст] / И.А. Ковалевская. – Днепропетровск: РВК НГА України, 2003. – 235 с.

68. Ковалевская, И.А. Геомеханика управления устойчивостью пространственной системы «массив-упрочненные породы-крепь подземных выработок» [Текст]: дис. д-ра техн. наук / И.А. Ковалевская. – Днепропетровск, 2004. – 349 с.

69. Ковалевская, И.А. Расчет параметров многослойной крепи горных выработок с переменной толщиной слоев [Текст] / И.А. Ковалевская. – Днепропетровск: ГНПП Системные технологии, 1999. – 43 с.

70. Ковалевская, И.А. Расчет параметров управления устойчивостью подсистемы «упрочненные породы-крепь подземных выработок» [Текст] / И.А. Ковалевская. – Днепропетровск: Системные технологии, 2005. – 113 с.

71. 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, 1993. – 408 с.

72. Симанович, Г.А. Устойчивость подземных горных выработок [Текст] / Г.А. Симанович. – Днепропетровск: «Системные технологии», 2005. – 161 с.

73. Бугаев, И.В. Обоснование параметров усовершенствованной технологии тампонажа закрепного пространства горных выработок [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / И.В. Бугаев. – Днепропетровск, 2000. – 134 с.

74. Расчеты параметров тампонажа закрепного пространства горных выработок [Текст] / В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, И.В. Бугаев, Г.А. Симанович. – Днепропетровск: ГНПП «Системные технологии», 1998. – 180 с.

75. Дунаев, А.Г. Обоснование параметров охраны повторно используемых штреков при бурошнековой выемке угольных пластов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А.Г. Дунаев. – Днепропетровск, 2002. – 181 с.

76. Охрана подготовительных выработок при бурошнековой выемке угольных пластов [Текст] / В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, А.Г. Дунаев. – Днепропетровск: Системные технологии, 2001. – 187 с.

77. Стренг, К. Теория метода конечных элементов [Текст] / К. Стренг, Дж. Фикс. – М.: Мир, 1977. – 349 с.

78. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация [Текст] / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 318 с.

79. Норри, Д. Введение в метод конечных элементов [Текст] / Д. Норри, де Фриз Ж. – М.: Мир, 1981. – 304 с.

80. John, F. Lectures on advanced numerical analysis / F. John. – New York: Nelson, 1966. – 180 p.

81. Courant, R. On nonlinear partial differential equation with two independent variables / R. Courant, P.D. Lax // Comm. Pure Applied Math. – №2. – 1949. – P. 255-274.

82. Ильюшин, А.А. Пластичность [Текст] / А.А. Ильюшин. – М.-Л.: Гостехтеориздат, 1948. – 376 с.

83. Traub, J.F. Iterative Methods for the Solution of Equations / J.F. Traub. – Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1964. – 282 p.

84. Strang, G., Fix, G. An Analysis of the Finite Element Method / G. Strang, G. Fix. – Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1964. – 366 p.

85. Donea, J. Finite Element Methods for Flow Problems / J. Donea, A. Huerta. – Chichester: John Wiley and Sons Ltd., 2003. – 364 p.

86. Расчеты элементов конструкций на прочность и жесткость. Интегрированная система автоматизации конструирования и прочностных расчетов изделий машиностроения Кипр-ЕС [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. В.И. Мяченкова. – М.: Мосстанкин. 1987. – 188 с.
87. Forsythe, G.F. Finite Difference Methods for Partial Differential Equations / G.F. Forsythe, W.R. Wasow. – New York: John Wiley and Sons, 1960. – 324 p.
88. Морозов, Е.М. Метод конечных элементов в механике разрушения [Текст] / Е.М. Морозов, Г.П. Никишков. – М.: Наука, 1980. – 254 с.
89. Сиратори, М. Вычислительная механика разрушения [Текст] / М. Сиратори, Т. Миес, Х. Мацусита. – М.: Мир, 1986. – 342 с.
90. Хеллан, К. Введение в механику разрушения [Текст] / К. Хеллан. – М.: Мир, 1988. – 286 с.
91. Вычислительные методы в механике разрушения [Текст] / под ред. С. Атлури. – М.: Мир, 1990. – 392 с.
92. Zienkiewicz, O.C. The finite element method. Solid mechanics / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. – Oxford: Butterworth Heinemann, 2000. – Vol. 2. – 480 p.
- 93 Самарский, А.А. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент [Текст] / А.А. Самарский // Вестник АН СССР. – 1979. – №5. – С. 38-49.
94. Холстед, М.Х. Начала науки о программах [Текст] / М.Х. Холстед. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 128 с.
95. Фуксман, А.Л. Технологические аспекты создания программных систем [Текст] / А.Л. Фуксман. – М.: Статистика, 1979. – 184 с.
96. Соболев, И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями [Текст] / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – М.: Наука, 1981. – 110 с.
97. Ершов, А.П. Смешанные вычисления [Текст] / А.П. Ершов // В мире науки. – 1984. – №6. – С. 28-42.
98. Дейкстра, Э. Дисциплина программирования [Текст] / Э. Дейкстра. – М.: Мир, 1978. – 274 с.
99. Parnas, D.L. On the criteria to be used in decomposing systems into modules / D.L. Parnas // Comm.ACM. – 1972. – V.15. – N.12. – P. 1053-1058.
100. Бабаев, И.О. Язык Декарт – входной язык системы СПОРА [Текст] / И.О. Бабаев, Ф.А. Новиков, Т.И. Петрушина // Прикладная информатика. – М.: Финансы и статистика, 1981. – Вып.1. – С. 35-72.
101. Пакет Сафра: программное обеспечение вычислительного эксперимента [Текст] / М.М. Горбунов-Посадов, В.Я. Карпов, Д.А. Корягин и др. // Алгоритмы и алгоритмические языки. Пакеты прикладных программ. Вычислительный эксперимент. – М.: Наука, 1983. – С. 12-50.
102. Фути, К. Языки программирования и схемотехника СБИС [Текст] / К. Фути, Н. Судзуки. – М.: Мир, 1988. – 224 с.
103. Горбунов-Посадов Системное обеспечение пакетов прикладных программ [Текст] / М.М. Горбунов-Посадов, Д.А. Корягин, В.В. Мартынюк. – М.: Наука, 1990. – 208 с.

104. Вирт, Н. Язык программирования Оберон (пересмотренное сообщение) [Текст] / Н. Вирт // Системная информатика. – Новосибирск: Наука, 1991. – Вып.1. – С. 40-63.
105. Зенкенвич, О. Метод конечных элементов в технике [Текст] / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 540 с.
106. Sandhu, R.S. Finite-Element Analyses of Seepage in Elastic Media / R.S. Sandhu, E.L. Wilson // J. of Soil Mech. and Found. Div. ASCE. – 1968. – Vol. 95. – P. 641-651.
107. Морозов, Е.М., Никшиков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения [Текст] / Е.М. Морозов, Г.П. Никшиков. – М.: Наука, 1980. – 256 с.
108. Зильберман, А.И. Решение задач о распределении напряжений и деформаций в массиве горных пород в зоне сопряжения двух выработок [Текст] / А.И. Зильберман, Л.В. Новикова, В.С. Лесников // Шахтное строительство. – 1983. – №5. – С. 9-10.
109. Jaburek, F. Elementmethode zur Berechnung ebener Spannungs-und Verformungszustände ein Hilfsmittel der Gebirgsmechanik / F. Jaburek, G. Hofler, F. Sturn // Burgund Huttenmannische Monatshefte. – 1970. – №115. – P. 32-35.
110. Ержанов, Ж.С., Каримбаев Т.Д. Метод конечных элементов в задачах механики горных пород [Текст] / Ж.С. Ержанов, Т.Д. Каримбаев. – Алмата: Наука, 1975. – 238 с.
111. Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике [Текст] / А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1987. – 224 с.
112. Фадеев, А. Б. Метод конечных элементов при решении геотехнических задач и программа «Геомеханика» [Текст]: учеб. пособие / А.Б. Фадеев, П.И. Репина, Э.К. Абдылдаев. – Л.: ЛИСИ, 1982. – 48 с.
113. Парамонов, В.Н. Решение задач фильтрационной консолидации с учетом ползучести скелета грунта методом конечных элементов [Текст] / В.Н. Парамонов // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – Интернет-журнал. – 1999. – №1. <http://www.geotec.narod.ru/mag/1999n1/8.htm>.
114. Потапов, А.В. Численное моделирование нестационарных геомеханических процессов с низким внутренним трением [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А.В. Потапов. – М., 1991. – 168 с.
115. Адушкин, В.В. Численное моделирование лавинообразного обрушения вулкана Корякский [Текст] / В.В. Адушкин, Ю.Н. Зыков, Б.А. Иванов // Вулканология и сейсмология. – 1995. – №6. – С. 24-28.
116. Sasaoka, T. Effect of the Chemical Grout Injection into the Surrounding Soil around the tunnel in Using Slurry Pipe-jacking / T. Sasaoka, H. Shimada, S. Kubota, K. Matsui. – International Symposium on Geotechnological Issues of Underground Space Use for Environmentally Protected World-2001. – Dnipropetrovsk: NMUU. – 2001. – P. 17-24.
117. Postolskaya, O.K., Man'ko A.V., Jarosch M. Information system for large projects in rock engineering / O.K. Postolskaya, A.V. Man'ko, M. Jarosch. – In A. Herrmann (eds). – Messtechnik im Erd-und Grundbau. – Siegener symposium. Siegen-2001. – Germany: Universitdt Siegen. Institut fbr Geotechnik. – 2001. – P. 234-241.

118. Манько, А.В. Географические информационные системы в задачах геомеханики [Текст] / А.В. Манько // Межвуз. сб. научн. трудов по гидротехническому и специальному строительству – М.: МГСУ, СПб ГТУ. – 2002. – С. 161-166.
119. Walaszczyk, J. Model niszczenia skal stropowych gorotworu bedacego zrodlem intensywnych zjawisk dynamicznych / J. Walaszczyk, J. Drzewiecki, G. Mutke. – Krakow: PATRIA, 2002. – 99 p.
120. Рязанцев, А.П. Компьютерное моделирование способа повышения устойчивости капитальных выработок в условиях пучения пород почвы [Текст] / А.П. Рязанцев, В.В. Коваленко, А.В. Гладкий // Сб. научн. трудов. Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений.– Донецк: Норд-пресс, 2004. – С. 52-53.
121. Болтенгаген, И.Л. Влияние ориентации главных начальных напряжений на механическое состояние массива горных пород вокруг выработок [Текст] / И.Л. Болтенгаген // Физико-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. – 2002. – №3. – С. 35-43.
122. Бабиюк, Г.В., Мележик А.И., Курман С.А. Оценка напряженного состояния массива при проведении выработки [Текст] / Г.В. Бабиюк, А.И. Мележик, С.А. Курман // Уголь Украины. – 2002. – №3. – С. 22-26.
123. Протосеня, А.Г. Пространственное напряжено-деформированное состояние призабойной зоны массива пород при сооружении тоннелей в нелинейно-деформируемых грунтах [Текст] / А.Г. Протосеня, Д.А. Потемкин // Известия вузов. Горный журнал. – 2002. – №6. – С. 45-48.
124. Самоделкина, Н.А. Об одном способе учета реологических свойств пород в конечноэлементном анализе геомеханических процессов [Текст] / Н.А. Самоделкина // Физико-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. – 2003. – №3. – С. 14-20.
125. Солодянкин, А.В. Оценка напряженно-деформированного состояния породного массива вокруг очистных выработок комплексом численных методов [Текст] / А.В. Солодянкин, И.Ю. Старотиторов // Сб. научн. трудов: Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений. – Донецк: Норд-пресс, 2004. – С. 73-74.
126. Ламонина, Е.В. Численное моделирование трещиноватых скальных массивов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Е.В. Ламонина. – М., 2006. – 182 с.
127. Павлова, Л.Д. Моделирование геомеханических процессов в разрушаемом углепородном массиве [Текст] / Л.Д. Павлова. – Новокузнецк: СибГИУ, 2005. – 239 с.
128. Павлова, Л.Д. Расчет параметров опорного давления в угольном пласте [Текст] / Л.Д. Павлова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – №4. – С. 57-60.
129. Годунов, С.К. Разностные схемы [Текст] / С.К. Годунов, С.К., В.С. Рябенский. – М.: Наука, 1977. – 243 с.
130. Бахвалов, Н.С. Численные методы [Текст] / Н.С. Бахвалов. – М.: Наука, 1973. – 632 с.

131. Дэннис, Д. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений [Текст] / Д. Дэннис, Р. Шнабель. – М.: Мир, 1988. – 440 с.
132. Яненко, Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики [Текст] / Н.Н. Яненко. – Новосибирск: Наука, 1967. – 231 с.
133. Самарский, А.А. Численные методы [Текст] / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1989. – 429 с.
134. Калиткин, Н.Н. Численные методы [Текст] / Н.Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 197 с.
135. Виноградов, В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок методы [Текст] / В.В. Виноградов. – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с.
136. Булычев, Н.С. Механика подземных сооружений [Текст] / Н.С. Булычев. – М.: Недра, 1982. – 272 с.
137. Баклашов, И.В. Механические процессы в породных массивах [Текст] / Баклашов И.В., Картозия Б.А. – М.: Недра, 1986. – 415 с.
138. Сажин, В.С. Упруго-пластическое распределение напряжений вокруг горных выработок различного очертания [Текст] / В.С. Сажин. – М.: Наука, 1968. – 94 с.
139. Перлин, П.И. Упруго-пластическое распределение напряжений вокруг отверстий [Текст] / П.И. Перлин // Труды МФТИ. – 1960. – №5. – С. 117-134.
140. Ставрогин, А.Н. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах [Текст] / А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня. – М.: Недра, 1985. – 271 с.
141. Фотиева, Н.Н. Расчет крепи подземных сооружений в сейсмически активных районах [Текст] / Н.Н. Фотиева. – М.: Недра, 1980. – 222 с.
142. Выгодин, М.А. Пучение пород почвы в выработках на шахтах Западного Донбасса [Текст] / М.А. Выгодин, В.В. Евтушенко // Уголь Украины. – 1987. – №7. – С.12-13.
143. Глушко, В.Т. Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления [Текст] / В.Т. Глушко, В.В. Виноградов. – М.: Недра, 1982. – 192 с.
144. Яворский, В.Н. Обоснование параметров технологии отработки угольных целиков камерами в условиях шахт Западного Донбасса [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / В.Н. Яворский. – Днепропетровск, 2000. – 140 с.
145. Усаченко, Б.М. Свойства пород и устойчивость горных выработок [Текст] / Б.М. Усаченко. – К.: Наукова думка, 1979. – 136 с.
146. Усаченко, Б.М. Геомеханика охраны выработок в слабометаморфизованных породах [Текст] / Б.М. Усаченко, В.П. Чередниченко, И.Е. Головчанский. – Киев: Наукова думка, 1990. – 144 с.
147. Руководство по размещению, выбору и расчету крепи и защите подземных горных выработок [Текст]. – М.: Стройиздат, 1980. – 374 с.

148. Унифицированные типовые сечения горных выработок [Текст]. – К.: Будівельник, 1971. – Т. 1. – 416 с.
149. Сечения горных выработок, закрепленных металлической арочной шатровой крепью для условий шахт Западного Донбасса [Текст]. – Днепропетровск: Фонды института «Днепрогипрошахт» (архивный №188406), 1988. – 274 с.
150. Гелескул, М.Н. Справочник по креплению капитальных и подготовительных горных выработок [Текст] / М.Н. Гелескул, В.Н. Каретников. – М.: Недра, 1982. – 479 с.
151. Сопротивление материалов [Текст] / под ред. Г.С. Писаренко. – К.: Вища школа, 1979. – 696 с.
152. Совершенствование способов охраны подготовительных выработок [Текст] / А.М. Симанович, М.А. Сребный, В.И. Малов, И.Л. Белинский. – Донецк: Донбасс, 1973. – 121 с.
153. Симанович, А.М. Охрана выработок на глубоких горизонтах [Текст] / А.М. Симанович, М.А. Сребный. – М.: Недра, 1976. – 144 с.
154. Максимов, А.П. Тампонаж горных пород [Текст] / А.П. Максимов, В.В. Евтушенко. – М.: Недра, 1978. – 180 с.
155. Каталог шахтопластов Донецкого угольного бассейна с характеристикой горно-геологических факторов и явлений [Текст]. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1982. – 268 с.
156. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи [Текст]. – М.: Стройиздат, 1983 – 273 с.
157. Руководство по поддержанию горных выработок на шахтах Западного Донбасса [Текст]. – СПб: ВНИМИ, 1992. – 51 с.
158. Заславский Ю.З., Зорин А.Н., Черняк И.Л. Расчеты параметров крепи выработок глубоких шахт [Текст] / Ю.З. Заславский, А.Н. Зорин, И.Л. Черняк. – К.: Техника, 1972. – 156 с.
159. Ферстер, Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа / Э. Ферстер, Б. Ренц. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 302 с.
160. Львовский, Е.Н. Статистические методы построение эмпирических формул [Текст] / Е.Н. Львовский. – М.: Высшая школа, 1988. – 233 с.
161. Афифи, А. Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ [Текст] / А. Афифи, С. Айзен. – М.: Мир, 1982. – 488 с.
162. Черняк, И.Л. Предотвращение пучения почвы горных выработок [Текст] / И.Л. Черняк. – М.: Недра, 1973. – 237 с.
163. Черняк, И.Л. Управление состоянием массива горных пород [Текст] / И.Л. Черняк, С.А. Ярунин. – М.: Недра, 1995. – 395 с.
164. Руководящий нормативный документ Министерства угольной промышленности. Расположение, охрана и поддержание горных выработок при отработке угольных пластов на шахтах. Методические указания [Текст]: КД 12.01.01.201-98. – Киев: УкрНИМИ, 1998. – 149 с.
165. Байсаров, Л.В. Геомеханика и технология поддержания повторно используемых горных выработок [Текст] / Л.В. Байсаров, М.А. Ильяшов, А.И. Демченко. – Днепропетровск: ЧП «Лира ЛТД», 2005. – 240 с.

166. Усаченко, Б.М. Охрана подготовительных выработок глубоких горизонтов шахт Западного Донбасса [Текст] / Б.М. Усаченко, В.Я. Кириченко, А.В. Шмиголь. – М.: ЦНИИЭуголь, 1992. – 168 с.

167. Правила безопасности в угольных и сланцевых шахтах [Текст]. – М.: Недра, 1986. – 447 с.

168. Правила безпеки у вугільних шахтах [Текст] / ДНАОП. – К.: Основа, 1996. – 418 с.

169. Курленя, М.В. Расчет напряженного состояния массива пород с использованием натуральных данных о деформировании [Текст] / М.В. Курленя, В.Е. Миренков, А.В. Шутов // Физико-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. – 1999. – №3. – С. 27-35.

170. Ковалевская, И.А. Анализ подходов к разработке методов расчета параметров упрочнения вмещающих горную выработку слабых пород анкерами [Текст] / И.А. Ковалевская, В.В. Поротников, В.В. Фомичев // Науковий вісник НГУ. – 2005. – №8. – С. 7-8.

171. Технология изготовления и установки трубчатых анкеров взрывным способом [Текст] / В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович и др. – Днепропетровск: Системные технологии, 2006. – 56 с.

172. Временное руководство по расчету параметров трубчатой анкерной крепи [Текст] / В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович и др. – Системные технологии, 2005. – 46 с.

173. Шмиголь, А.В. Обоснование способа и средств крепления выемочных штреков в условиях шахт Западного Донбасса [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.В. Шмиголь; [ДГИ]. – Днепропетровск, 1989. – 17 с.

174. Гуджабидзе, И.К. Обоснование конструкций крепления и параметров горных выработок в условиях сводообразования [Текст] / И.К. Гуджабидзе, З.Г. Гудавадзе, З.Б. Лебанидзе // Горный журнал. – 2004. – №4. – С. 87-88.

175. Булычев, Н.С. Проектирование и расчет крепи капитальных выработок [Текст] / Булычев Н.С., Фотиева Н.Н., Стрельцов Е.В. – М.: Недра, 1986. – 288 с.

176. Управление напряженным состоянием породного массива и устойчивостью горных выработок [Текст] / В.А. Полухин, С.А. Калоеров, Ю.Б. Грядущий, Е.С. Горянская. – Донецк: Юго-Восток, 2002. – 302 с.

177. Тулуб, С.Б. Підвищення стійкості підготовчих виробок з підшвою, що зривається, в умовах шахт Західного Донбасу [Текст] / С.Б. Тулуб // Науковий вісник НГУ. – 2003. – №1. – С.49-50.

178. Фесенко, Э.В. Прогноз и закономерности пучения слоистых пород почвы горных выработок [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Э.В. Фесенко. – Днепропетровск: НГУ. – 187 с.

179. Заславский, Ю.З. Исследование проявлений горного давления в капитальных выработках глубоких шахт Донецкого бассейна [Текст] / Ю.З. Заславский. – М.: Недра, 1966. – 180 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Раздел 1. РАЗВИТИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ И ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ В РЕШЕНИЯХ ЗАДАЧ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ «МАССИВ-КРЕПЬ»	9
1 РАЗВИТИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГЕОМЕХАНИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ «МАССИВ-КРЕПЬ»	9
1.1 Современные аналитические методы расчета НДС неоднородных геомеханических систем	9
1.2 Некоторые научно-практические результаты исследований ресурсосберегающих направлений поддержания подземных горных выработок на шахтах Западного Донбасса	20
2 АНАЛИЗ И ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ОСНОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАДАЧАХ ГЕОМЕХАНИКИ	32
2.1 Общие положения метода конечных элементов для решения пространственных задач геомеханики в упругой постановке	32
2.2 Обобщенная постановка задачи с учетом реологических свойств пород	36
2.3 Решение плоской задачи геомеханики в упруго- пластической постановке	40
2.4 Решение задачи геомеханики с использованием объемных конечных элементов	43
2.5 Обобщенная модель запредельного поведения пород	47
2.6 Теории пластичности и ползучести в задачах геомеханики при сложном нагружении	53
3 ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ В РЕШЕНИЯХ ЗАДАЧ ГЕОМЕХАНИКИ	59
3.1 Развитие математического моделирования и вычислительного эксперимента	59
3.2 Развитие методологии применения метода конечных элементов	69

3.3	Постановка и погрешность вычислительного эксперимента	82
3.4	Разработка и обоснование алгоритма исследований проблемы устойчивости горных выработок	90
	Раздел 2. ГЕОМЕХАНИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ «МАССИВ-КРЕПЬ» В ДОПРЕДЕЛЬНОЙ СТАДИИ ИХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ	96
4	ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМЕ «МАССИВ-КРЕПЬ»	96
4.1	Обоснование общих исходных параметров модели	96
4.2	Обоснование структуры модели углевлещающей породной толщи вокруг пластовой выработки	103
5	ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОДНЫХ СЛОЕВ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ «МАССИВ-КРЕПЬ»	123
5.1	Методика исследований	123
5.2	Тенденции изменения напряженного состояния пород кровли пластовой выработки	124
5.3	Особенности изменения напряженного состояния пород в боках пластовой выработки	132
5.4	Особенности изменения напряженного состояния пород почвы пластовой выработки	137
5.5	Характер изменения напряженного состояния рамной крепи пластовой выработки	140
6	ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ СИСТЕМЫ «МАССИВ-КРЕПЬ» С УВЕЛИЧЕНИЕМ ГЛУБИНЫ РАЗРАБОТКИ	142
6.1	Исследование изменений напряжений в породах кровли выработки	142
6.2	Исследование изменений напряжений в породах почвы выработки	151
6.3	Исследование изменений напряжений в породных боках выработки	160
6.4	Исследование изменений напряжений в крепи выработки	171

6.5	Исследование зоны предельного состояния пород вокруг пластовой выработки в тонкослоистом массиве слабых пород	171
	Выводы	175
	Раздел 3. ГЕОМЕХАНИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ «МАССИВ-КРЕПЬ» В ПРЕДЕЛЬНОЙ И ЗАПРЕДЕЛЬНОЙ СТАДИЯХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ	177
7	МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛНЫХ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ «МАССИВ-КРЕПЬ»	177
8	ВЛИЯНИЕ НА НДС СИСТЕМЫ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОДНЫХ СЛОЕВ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕЙ ТОЛЩИ	182
8.1	Анализ эпюр перемещений	182
8.2	Напряженное состояние углевмещающего породного массива	187
8.3	Напряженное состояние рамной крепи	193
9	ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ НДС СИСТЕМЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СООТНОШЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОИСТОГО УГЛЕВМЕЩАЮЩЕГО МАССИВА	198
9.1	Напряженное состояние углевмещающего породного массива	198
9.2	Поле перемещений в окрестности пластовой выработки	205
9.3	Напряженное состояние рамной крепи	211
10	ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ НА НДС СИСТЕМЫ «МАССИВ-КРЕПЬ»	217
10.1	Напряженное состояние близлежащего слоистого массива	217
10.2	Поле перемещений в окрестности пластовой выработки	235
10.3	Напряженное состояние рамной крепи	248
	Выводы	254

Раздел 4. ГЕОМЕХАНИКА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ КОНТУРА ПЛАСТОВЫХ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК	256
11 ЗАКОНОМЕРНОСТИ СВЯЗИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ КОНТУРА ВЫРАБОТКИ С ГЕОМЕХАНИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ СИСТЕМЫ «МАССИВ-КРЕПЬ»	256
11.1 Методика проведения вычислительного эксперимента	257
11.2 Влияние геомеханических параметров углевмещающего массива на смещения кровли выработки	262
11.3 Закономерности сближения боков выработки	268
11.4 Влияние геомеханических параметров углевмещающего массива на пучение почвы выработки	276
11.5 Закономерности изменения контура пластовой выработки	281
Выводы	284
12 ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ПРОЕКТНОГО РЕШЕНИЯ ПО ВЫБОРУ ЕЕ ТИПОРАЗМЕРА	287
12.1 Методика исследования влияния типоразмера выработки на перемещения ее контура	287
12.2 Закономерности влияния типоразмера пластовой выработки на эпюру перемещений ее контура	290
12.3 Оценка достоверности прогноза перемещений контура выработки	298
12.4 Обоснование критериев оценки эксплуатационной пригодности выработки	306
12.5 Построение уравнений регрессии для расчета эпюры перемещений контура пластовой выработки	310
12.6 Алгоритм оценки проектного решения по выбору типового сечения пластовой выработки	313
ВЫВОДЫ	315
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	317
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК	321
СОДЕРЖАНИЕ	333

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Наукове видання

**Бондаренко В.І., Мартовицький А.В.,
Ковалевська І.А., Черватюк В.Г.**

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ
ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК
ШАХТ ЗАХІДНОГО ДОНБАСУ**

Монографія

Російською мовою

Підписано до друку 18.06.10. Формат 701/290 1/16.
Папір офсет. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 24,65.
Обл.-вид. арк. 27,91. Тираж 300 прим. Замовлення №180610.

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.



МАРТОВИЦКИЙ Артур Владимирович
генеральный директор ОАО «Павлоград-
уголь», кандидат технических наук,
заслуженный шахтёр Украины, кавалер
ордена «За заслуги» III степени.



КОВАЛЕВСКАЯ Ирина Анатольевна
профессор кафедры подземной
разработки месторождений
Национального горного университета,
доктор технических наук.



ЧЕРВАТЮК Виктор Григорьевич
директор Дирекции по перспективному
развитию ОАО «Павлоградуголь»,
кандидат технических наук.