

## АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДАТЛИВОЙ КРЕПИ ПЛАСТОВЫХ ВЫРАБОТОК ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Приведены результаты расчетов математического моделирования взаимодействия различных видов крепи с горным массивом.

Наведено результати розрахунків математичного моделювання взаємодії різних видів кріплення з гірським масивом.

The mathematical modeling results of the interaction of different types of supports with rock massif are presented.

**Вступление.** Для выбора любых мероприятий по поддержанию и охране выемочной выработки в условия рассматриваемых в данном вычислительном эксперименте необходимо четко представлять общий геомеханический принцип, на основе которого формируется НДС системы «крепь выработки – горный массив». Как видно, из эпюр напряжений, представленных на и рис. 1, создание разгрузочной зоны приводит к формированию породной консоли, с одной стороны, жестко защемленной в нетронутым горным массиве, а с другой - свободно опирающейся на деревянный костер и органную крепь. В этом плане применение инвентарной крепи в сочетании с пеной «Карбофил» позволяет не повысить жесткость образовавшегося пролета, а обеспечивает снижение градиента роста деформаций на нижней поверхности породной консоли. Таким образом, концентрация напряжений в наполнителе невозможна по условиям рассматриваемой задачи, а напряжения в стойках и бруске инвентарной крепи указывают на геометрию зоны пониженных деформаций в породной консоли. То есть, данный элемент поддержания выработки выполняет функции демпфера при передаче усилий на рамную крепь, что также соответствует условиям эксплуатации.

**Формулирование целей статьи.** Для рассмотрения режимов работы элементов поддержания выемочной выработки в разгрузочной зоне и оценки их эффективности рассмотрим картину напряженного состояния в виде эпюр вертикальных напряжений  $\sigma_y$  (см. рис. 1). Эпюры  $\sigma_y$  позволяют, прежде всего, объективно оценить качество выполненных расчетов путем сравнения полученных данных с общепринятыми теориями состояния горного массива, сопоставив обобщенные показатели эпюр и результаты аналитических решений.

Распределение вертикальных напряжений в элементах крепи разгрузочной зоны показывает наличие как сжимающих, так и растягивающих внутренних усилий. Максимумы сжимающих напряжений составляют 32...37 МПа, а растягивающих не превышают 5 МПа. Гидростатическое давление для вариантов расчетов, представленных на рис. 1, а и б, составляет 9,6 МПа, а для варианта рис. 1, в – 7,4 МПа, что соответствует глубине заложения рассматриваемой

мых выработок. При этом концентрации растягивающих напряжений в последнем варианте расчета выше в 1,7–2,2 раза, чем в предыдущих.

**Изложение основного материала исследований.** В целом максимальное сопротивление крепи сосредоточено в деревянных стойках. Инвентарная крепь, деревянный костер и органная крепь обеспечивают устойчивость выработки различными режимами работы. Отсюда и различное изменение характера их поведения в различных горно-геологических условиях. Рассмотрим по отдельности изменение состояния этих элементов крепи.

Органная крепь, очевидно, воспринимает внешнее давление с двух направлений: давление обрушенной породы и породной консоли примыкающей к разгрузочной зоне сверху (см. рис. 1). При этом при «малых» углах падения, до  $27^\circ$ , давление консоли является доминирующим, а в диапазоне от  $16^\circ$  и до  $23^\circ$  органная крепь находится под максимумом вертикальных напряжений в 35...37 МПа. Это означает, что с увеличением угла падения органная крепь перестает эффективно поддерживать породную консоль и переходит к выполнению функции сдерживания обрушенных пород. Легко видно, на рис. 1, в, что зоны концентрации напряжений в породах примыкающих к органной крепи отсутствуют, а сама крепь, в сравнении с другими элементами поддержания выработки нагружена на 12 % меньше.

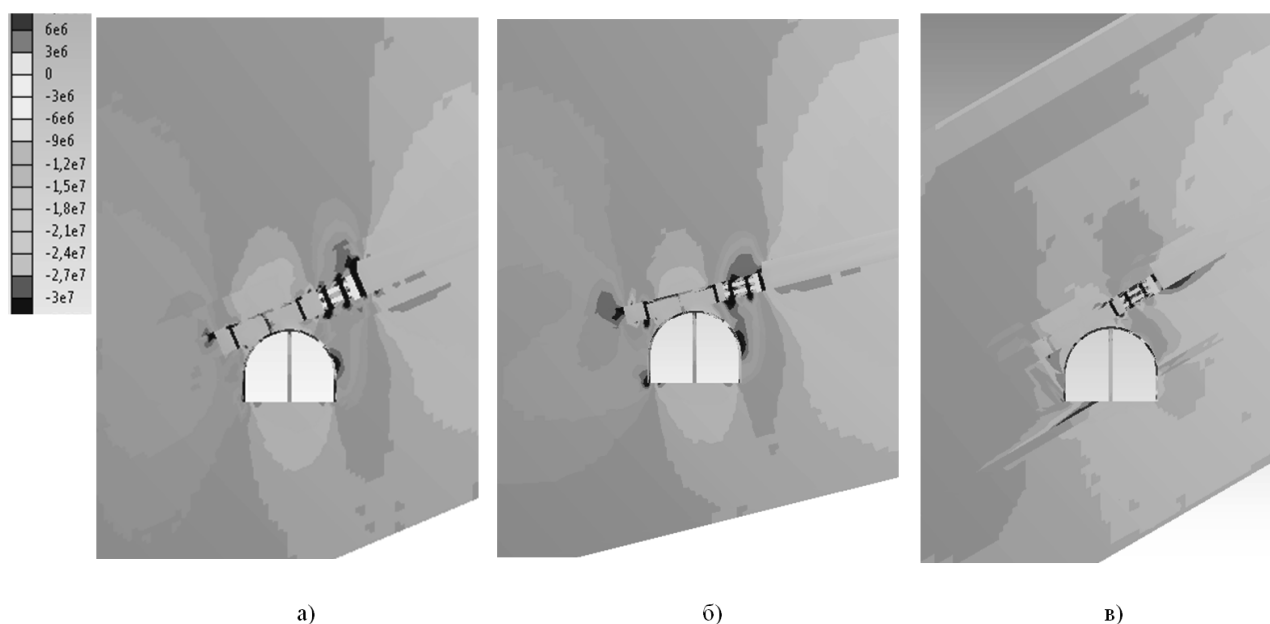


Рис. 1. Эпюры вертикальных напряжений полученные для горно-геологических условий шахт: а) «Золотое»; б) «Карбонит»; в) «Первомайская».

Как уже было сказано выше, в варианте расчета, представленном на рис. 1, б, органная крепь обеспечивает максимальный отпор горного давления, а так же, по картине распределения напряжений в кровле разгрузочной зоны, участвует в единой грузонесущей системе с деревянным костром. С увеличением угла падения взаимное влияние этих элементов крепи снижается и при  $25^\circ$  полностью отсутствует.

Расчет, результаты которого приведены на рис. 1, а, во многом является показательным по поведению органной крепи под действием вертикальных нагрузок. В этом варианте органная крепь воспринимает максимум внешней нагрузки, и при этом находится в сложных эксплуатационных условиях. Как видно, по наличию и величине зон опорного давления, эта крепь обеспечивает максимум отпорных усилий в системе поддержания выемочной выработки. Таким образом, устойчивость породной консоли в случае шахты «Карбонит» прямо зависит от конструктивного состояния органной крепи. В этих и схожих горно-геологических условиях целесообразно повышать устойчивость выработки установкой дополнительного ряда органной крепи, с созданием первоначального отпора крепи, что приведет к снижению напряжений в ней на 30-40%,

Деревянный костер, во всех вариантах расчета, находился в пределах одной схемы нагружения, чему способствовали и его расположение, и конструктивные особенности. В области пересечения бруса доминирующими вертикальными напряжениями являются сжимающие, величина которых в различных вариантах расчета составляет 26...34 МПа. Остальные участки конструкции находятся под действием растягивающих напряжений, величина которых растет с увеличением угла падения, и изменяется в диапазоне от 2 до 7 МПа. Как показано, на рис. 1, именно деревянный костер обеспечивает опору консоли пород зависающей над выработкой со стороны выработанного пространства очистного забоя. Во всех выполненных расчетах данный элемент крепи формирует в прилегающих к нему породах горного массива зоны концентрации напряжений, величины которых достигают 27...34 МПа.

Кроме того, влияние костра на распределение  $\sigma_y$  по контуру правого бока выемочной выработки приводит к изменению характеристик зоны повышенных сжимающих напряжений. С ростом угла падения влияние костра на НДС правого бока уменьшается. Если при углах в 10-19° между зонами концентрации напряжений на контуре выработки и в области давления деревянного костра существует зона взаимного влияния, представленная градиентом напряжений (см. рис. 1, б) и в абсолютном значении на 13% меньшим, чем максимум, то для варианта, представленного на рис. 1, а, интенсивность градиента уменьшается в 0,64 раза, а абсолютное значение составляет менее 27 %. Следовательно, напрашивается вывод о снижении вероятности развития трещин в правом боку выработки под действием вертикальных напряжений для данной схемы ее поддержания.

При больших углах падения, в 26–40°, опорные зоны концентрации напряжений в породах, примыкающих к костру, практически отсутствуют. Незначительный градиент в совокупности с ростом напряжений в пределах 1–3 МПа, не могут оказывать серьезного влияния на изменение механического состояния пород горного массива в данных горно-геологических условиях. Отсюда вытекает, что при таких углах падения вертикальное давление на деревянный костер падает в пределах 9–14 МПа, что вызвано естественными причинами перераспределения величин векторов внутренних усилий в направлении напластования горного массива.

Еще одной важной характеристикой взаимодействия деревянного костра и пород горного массива являются параметры зон опорного давления. Как видно на рис.1 в каждом расчетном варианте в почве разгрузочной зоны давление костра формирует две зоны концентрации напряжений. Для простоты описания обозначим их как «верхняя» и «нижняя», по координате их расположения. Абсолютные величины концентрации напряжений в этих зонах колеблются в диапазоне от 4 и до 9, причем с ростом угла падения степень концентрации падает в логарифмической последовательности. Вместе с уменьшением значений напряжений  $\sigma_y$  происходит их перераспределение между «верхней» и «нижней» зонами опорного давления костра. «Верхняя» зона при достижении величины угла падения в  $27^\circ$  исчезает, а «нижняя» – до  $24^\circ$  сохраняет свои размеры и величину концентрации напряжений с тем, чтобы до  $40^\circ$  по линейной зависимости сократить эти показатели в 6 и 2 раза, соответственно. Таким образом, мы приходим к выводу о снижении конструктивной устойчивости деревянного костра, с ростом угла падения, начиная с  $25\text{--}28^\circ$ .

Последним элементом крепления разгрузочной зоны, подлежащему рассмотрению, является инвентарная крепь в совокупности с заполнителем «Карбофил». Как уже было сказано ранее, данный элемент крепи не воспринимает значительных внешних нагрузок. Однако, стойки инвентарной крепи в различных вариантах расчета ведут себя по-разному. Легко видно, что на распределение внутренних усилий в этих элементах крепи влияет угол падения породных слоев горного массива. В варианте расчета, результаты которого представлены на рис. 1, б, крайние стойки инвентарной крепи нагружены равномерно и величина сжимающих вертикальных напряжений в них достигает 32 МПа. При этом центральная часть поперечного бруса и средняя стойка испытывают незначительные, порядка 2 МПа, растягивающие напряжения. Здесь неравномерное, в направлении напластования, распределение вертикальных напряжений в поперечном бруске указывает на форму провисания образованного породного пролета [1]. Как видно, кривизна прогиба растет в направлении по падению сверху вниз. В результате средняя стойка инвентарной крепи оказывается в зоне с малыми деформациями породного контура и как результат остается ненагруженной.

Эпюра вертикальных напряжений, представленная на рис. 1, а, демонстрирует присутствие слабых растягивающих напряжений в средней части инвентарной крепи. В совокупности с двумя участками напряжений близких к нулю, в теле поперечного бруса, это дает возможность утверждать о наличии двух периодов в форме деформирования породного контура разгрузочной зоны. В результате средняя стойка инвентарной крепи оказывается в неустойчивом состоянии, при котором происходит ее поперечный изгиб, что и отображено на эпюре (см. рис. 1, б) наличием неравномерных растягивающих напряжений в 2-4 МПа. Таким образом, в этом варианте расчета показано оптимальное распределение вертикальных усилий при формировании разгрузочной зоны над выемочной выработкой в представленной схеме крепи.

Последней рассмотрим картину вертикальных напряжений на рис. 1, в. Существенное увеличение угла падения приводит к разгрузке левой и средней

стоек инвентарной крепи, отсутствует любой вид концентрации напряжений и площадок опорного давления. Также отсутствует ощутимый прогиб поперечного бруса крепи. С другой стороны концентрация напряжений в правой стойке достигает уровня 11, а в породах примыкающих торцам этой стойки формируются ярко выраженные зоны концентрации растягивающих напряжений. При этом эти зоны располагаются по разные стороны от оси стойки. Данная картина характерна при вдавливании конструктивного элемента при косом нагружении. При таком виде нагружения стойка находится в неустойчивом статическом равновесии и должна быть усилена установкой дополнительной стойки вплотную к уже существующей.

На представленных эпюрах вертикальных напряжений (см. рис. 1) сложную картину распределения внутренних усилий имеют элементы рамной крепи. Следует заметить, что полученная картина напряженно-деформированного состояния рамой крепи качественно и количественно соответствует натурным наблюдениям, проводимым на участках применения рассматриваемой системы поддержания выработок. Получение таких результатов стало возможным за счет методики моделирования рамной крепи, которая состоит из пяти отдельных моделей – верхняка, двух стоек и узлов податливости. За счет снижения сопротивления материала в узлах податливости стало возможным относительно независимое деформирование верхняка и стоек рамы [2].

Начнем с рассмотрения с эпюры с наименьшим углом падения (см. рис. 1, б). В этом варианте полный градиент напряжений в раме имеет минимальное значение и составляет менее 211 МПа при наличии 5-ти ярко выраженных зон концентрации напряжений. Правая стойка рамы наименее нагружена. В ее верхней части наблюдается концентрация растягивающих напряжений с абсолютными значениями, достигающими 189 МПа, а вертикальная стойка находится под действием сжимающих напряжений в диапазоне значений от 14 до 28 МПа. Это указывает на то, что в этом варианте расчета правый бок выработки обладает достаточной устойчивостью, деформирование стойки осуществляется под действие верхняка рамной крепи. Левая стойка находится в сходных условиях, но уровень растягивающих напряжений возрастает на 11 %. Кроме того, в опорной зоне стойки присутствует дополнительная зона концентрации напряжений. Это указывает на локальное интенсивное деформирование стойки в сторону полости выработки. Верхняк рамы в зоне контакта с ремонтной, находится под действием растягивающих напряжений порядка 192...205 МПа, а в зоне контакта стойки инвентарной крепи, наоборот – под действием сжимающих напряжений аналогичных по величине. В целом такая картина распределения напряжений в верхняке рамы сохраняется во всех вариантах расчета и приводит к формированию S-образного контура деформирования. Преодоление этого эффекта возможно введением в конструкцию крепи дополнительной ремонтной, основание которой будет сопряжено с основанием существующей, а верхний конец будет упираться в верхняк в зоне левого узла податливости. Однако, такое решение, как показывают расчеты, может быть эффективным толь-

ко в отдельных случаях поддержания выработки и приводит к снижению ее эксплуатационных характеристик.

Наиболее оптимальным с точки зрения распределения напряжений в рамной крепи является варианта расчета, результаты которого приведены на рис.1, а. В данном случае распределение напряжений выравнивается относительно вертикальной оси выработки, максимумы напряжений в верхняке опять находятся в диапазоне близкому к предельному, а вертикальные части стоек нагружаются вплоть до 214 МПа, то есть приближаются к предельному состоянию. В целом наблюдается равномерное и контролируемое, за счет рамной крепи, опускание кровли. Это лишний раз подтверждает тот факт, что для выбранной схемы оптимальным диапазоном применения являются углы падения 18...26°.

Последним рассмотрим особенности работы рамной крепи в условиях расчета выполненного для шахты «Первомайская» (см. рис. 1, в). Для этого варианта характерно равномерное распределение зон повышенных растягивающих напряжений по всему контуру рамной крепи, максимальные значения напряжений в которых колеблется то 192 до 218 МПа. При этом такие зоны разделяются зонами сжимающих напряжений, диапазон максимальных значений которых составляет от 15 до 176 МПа. Такая картина распределения внутренних усилий указывает на переход элементов рамной крепи в предельное состояние с интенсивным перемещением приконтурных пород в полость выработки. Положительным в данном случае является то, что отдельные участки конструкции рамной крепи продолжают эффективно сопротивляться вертикальным нагрузкам, что позволяет при значительном росте линейных деформаций сохранить эксплуатационные характеристики выработки. Для расчетов в диапазоне углов падения от 27° до 40° становится характерным рост разнонаправленных вертикальных деформаций в нижних частях стоек рамы. Это указывает на изменение соотношения между вертикальными и горизонтальными деформациями, что указывает на изменение характера влияния разгрузочной зоны на НДС системы «крепь выработки – горный массив».

При формировании зон растягивающих напряжений (см. рис. 1, в) необходимо учитывать тот факт, что большой угол падения провоцирует возникновение областей пластических шарниров на левой и правой нижних границах разгрузочной зоны. В результате возникают зоны пластического течения, наличие которых приводит к сползанию пород боков выработки в её полость. Величины максимумов растягивающих напряжений  $\sigma_y$  при этом падают на 10–12%, наблюдается отсутствие зон концентраций этих напряжений, что и приводит к возникновению зон концентрации растягивающих напряжений. В этих зонах величины вертикальных напряжений составляют порядка 12–29 МПа, указывает на формирование условий для роста параллельных трещин в боках выемочной выработки.

Таким образом, напрашивается вывод об изменении характера трещинообразования с ростом угла падения. Если при углах падения до 26° в боках выработки отсутствуют условия для роста параллельных трещин, то для углов свыше 27° требуется введение дополнительных элементов крепи.

Таким элементом в левом боку выработки может стать сталеполимерный анкер длиной до 2,5 м, устанавливаемый горизонтально на высоте 0,5–1,2 м [3]. Для обеспечения устойчивости правого бока выработки возможно использование канатных анкеров устанавливаемых в кровле выработки в направлении напластования горного массива.

Переходим к анализу напряжений  $\sigma_{pl}$  ориентированных по плоскости напластования, представленных на рис. 2. Распределение напряжений  $\sigma_{pl}$  позволяет оценить отдельный вклад в НДС горного массива каждого из моделируемых породных слоев. При этом градиенты напряжений, наблюдаемые на эпюрах (см. рис. 2), имеют незначительные абсолютные значения в диапазоне от 17 МПа при сжатии до 8 МПа при растяжении. Таким образом, эти напряжения указывают на зоны падения поперечной прочности породных слоев, и их величина в малой степени зависит от угла падения породных слоев.

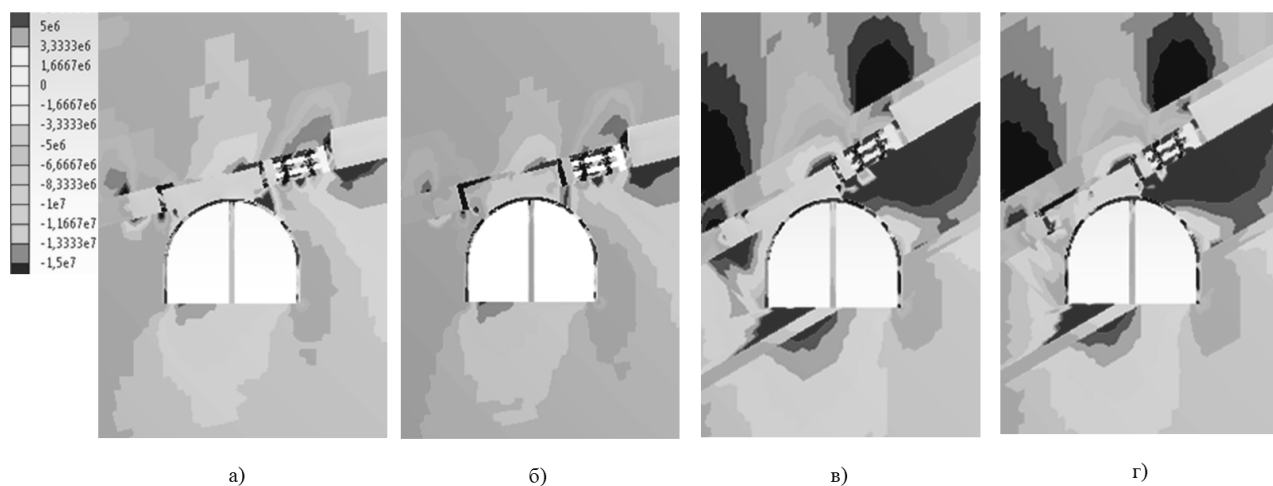


Рис. 2. Эпюры напряжений направленных вдоль плоскости напластования для шахты «Карбонит» расчет без (а) и с учетом (б) реологии, для шахты «Первомайская» – без (в) и с учетом (г) реологии.

Другой особенностью представленных эпюр напряжений  $\sigma_{pl}$  является учет изменения НДС системы «крепь выработки – горный массив» в зависимости от реологии пород. В ходе исследований расчеты с учетом реологических факторов были проведены для шахты «Карбонит» (см. рис. 2, а, б) и для шахты «Первомайская» (см. рис. 2, в, г). В обоих случаях выбирались кривые роста деформации пород во времени, полученные в лабораторных условиях [4, 5] на интервале до 90 суток.

Общей особенностью результатов проведенных расчетов стал рост напряжений в пене «Карбофил» от близких к нулю до 3,5 МПа. Это указывает как на увеличение деформаций в кровле разгрузочной зоны со временем, так и на способность наполнителя нести незначительную нагрузку в данной схеме поддержания выемочной выработки. Очевидно, что увеличение прогиба кровли разгрузочной зоны приводит к смятию части наполнителя и как результат увеличению его зональной плотности, что и приводит к очаговому росту сопротивления данного

материала. Поскольку форма и направление деформаций кровли разгрузочной зоны меняются с изменением угла падения, происходит перераспределение этих очагов в теле наполнителя и, начиная с  $26^\circ$ , они располагаются только в зоне левой и средней стоек инвентарной крепи. При этом возникают не только очаги сжимающих, но и очаги растягивающих напряжений, что, как уже было показано выше, указывает на потерю статического равновесия элементов инвентарной крепи при «больших» углах падения породных слоев.

Теперь проведем анализ изменения распределения напряжений  $\sigma_{pl}$  в почве выемочной выработки пройденной в различных горно-геологических условиях. В обоих вариантах (см. рис. 2, а и рис. 2, в) пучение почвы имеет большую величину со стороны левого бока выработки и вызвано наличием растягивающих напряжений. При малых углах падения до  $22^\circ$  величина этих напряжений составляет не более 6 МПа (см. рис. 2, а), что не может спровоцировать значительных деформаций почвы выработки. Однако с ростом угла падения, начиная с  $26^\circ$ , без изменения характера картины напряжений в почве выработки, происходит их значительный рост, величина которого составляет около 34 МПа. Даже наличие более прочного породного слоя пресекающего контур выработки в почве (см. рис. 2, в), не может внести в эту тенденцию существенную коррекцию. Это говорит о том, что для данной схемы поддержания выработки при определении величины пучения структура горного массива не является доминирующим фактором.

Как и в случае с почвой растягивающие напряжения  $\sigma_{pl}$  в боках выработки растут с увеличением угла падений. Однако увеличение максимумов напряжений имеет линейный характер и составляет примерно 0,3 МПа на один градус. С другой стороны, размеры зон растягивающих напряжений, начинают интенсивно расти с  $27^\circ$  угла падения породных пластов, и объединяются в две зоны доминирующих растягивающих напряжений в боках выработки (см. рис. 2, в). Таким образом, хотя абсолютные показатели растягивающих напряжений не указывают на достижение предельного состояния приконтурных пород, объем пород оказавшийся вовлеченным в процесс перемещения пород в полость выработки приводит к значительным деформациям контура выработки в боках.

**Выводы.** Изменение НДС системы «крепь – массив» происходящие с течением времени наиболее четко проявляются в боках выемочной выработки, и имеет ощутимые отличия в различных вариантах расчета (см. рис. 2, б и рис. 2, в). Влияние реологии пород на распределение концентраций напряжений в кровле разгрузочной зоны в обоих вариантах расчета имеет общий характер и заключается в снижении максимумов сжимающих напряжений на 18 % и растягивающих – более чем на 50 % (рис. 3). Как видно из представленных графиков процесс активной релаксации напряжений сжимающих напряжений приходится на интервал между 15...50 сутками, в то время как для растягивающих этот интервал начинается с 30 суток и заканчивается на 60-ые. Таким образом, изменение НДС кровли разгрузочной зоны, способное повлиять на изменение ее контура, происходит в первые два месяца после установки всех элементов крепежных и охранных конструкций.



Совершенно по-разному происходит изменение напряжений в боках выработок в зависимости от варианта расчета. Если для условий, представленных на рис. 2, в и г, максимальные значения напряжений в правом боку со временем не изменяются и значительно изменяются в левом (см. рис. 4), то для условий, представленных на рис. 2, а и б, имеем обратный вид. Это указывает на изменение характера распределения горного давления со временем при различных значениях угла падения породных слоев. Легко видно, кривые изменения максимума напряжений в левом и правом боках выемочной выработки представляют собой границы двух семейств кривых, каждая из которых изменяет степень своей кривизны и предельные значения в зависимости от угла напластования.

Для получения представления всего семейства кривых описывающих изменение максимумов напряжений  $\sigma_{pl}$  в боках выработки используем математические методики асимптотического приближения. В качестве базовых функций применим уравнения кубической параболы.

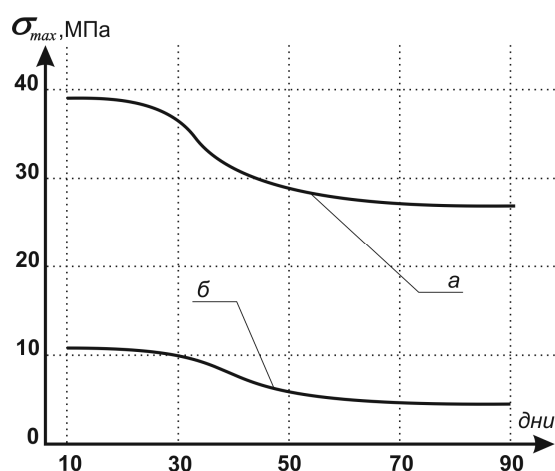


Рис. 3. График изменения максимальных напряжений  $\sigma_{pl}$  в кровле разгрузочной зоны выработки шахты «Карбонит»: сжимающих (а) и растягивающих (б).

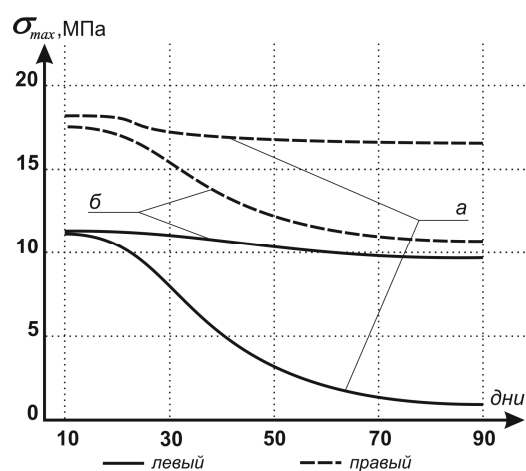


Рис. 4. Изменение значений максимальных напряжений  $\sigma_{pl}$  в правом и левом боках выработки для условий шахты «Первомайская» (а) и шахты «Карбонит» (б).

В результате для изменения напряжений  $\sigma_{pl}$  в левом боку выемочной выработки, в зависимости от времени и величины угла падения, получим следующее эмпирическое выражение

$$\sigma_{lf} = -\frac{(t_d - 6)^3}{3} + 0,15 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6} - 3\alpha\right) \cdot (t_d - 10) + 34,8, \quad (1)$$

где  $t_d$  — дни с момента возведения охранных конструкций;  $\alpha$  — угол падения породных слоев в радианах.

Аналогичным образом получили выражение для максимума напряжений в правом боку выработки

$$\sigma_{rt} = -0,4(t_d - 6)^3 + 0,06 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6} - 3\alpha\right) \cdot (t_d - 9,6) + 29, \quad (2)$$

где  $t_d$  – дни;  $\alpha$  – угол падения породных слоев.

#### Список литературы

1. Гапеев С.Н., Рязанцев А.Н. Учет слоистой структуры породного массива в задачах об устойчивости пород почвы одиночной выработки, расположенной вне зоны влияния лавы // Материалы международной конференции Форум горняков. – Днепропетровск: НГУ, 2005. – Том 1. – С. 179-185.
2. Моделирование предельного и запредельного состояния слоистого породного массива вокруг пластовой выработки / В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, В.В. Фомичев // Материалы междунар. конф. Форум горняков-2007, Том.1. – Днепропетровск: НГУ, 2007. – С.158-162.
3. Ковалевская И.А., Поротников В.В., Фомичев В.В. Анализ подходов к разработке методов расчета параметров упрочнения вмещающих горную выработку слабых пород анкерами // Науковий вісник НГУ. – 2005. – №8. – С.7-8.
4. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г., Певзнер Е.Д. Влияние скорости деформирования на запредельные характеристики горных пород // ФТПРПИ. – 1982. – №5. – С.8-15.
5. Самоделкина Н.А. Об одном способе учета реологических свойств пород в конечноэлементном анализе геомеханических процессов // ФТПРПИ. – 2003. – № 3. – С. 14-20.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Бондаренком В.І.  
Надійшла до редакції 11.09.2014*

УДК 621.66

© М.Н. Трубицин

### **УНИВЕРСАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДВУХПЛОСКОСТНОЙ БАЛАНСРОВКИ МЕТОДОМ АМПЛИТУД**

Рассмотрено решение задачи двухплоскостной балансировки жесткого ротора методом амплитуд в общей постановке. Разработанный алгоритм включает два этапа: на первом – решаются четыре задачи одноплоскостной балансировки для нахождения приведенных дисбалансов; на втором – по приведенным дисбалансам определяется начальная неуравновешенность ротора.

The solution of the problem of two-plane balancing of a rigid rotor by the amplitudes in the general setting. The developed algorithm consists of two phases: the first - four problems are solved one two-plane. Balancing for finding given the imbalances; the second - to bring imbalances to determine the initial rotor unbalance.

Розглянуто рішення задачі двохплощинного балансування жорсткого ротору за методом амплітуд у загальному вигляді. Розроблений алгоритм містить два етапи: на першому – вирішуються чотири окремі задачі одноплощинного балансування для визначення приведених дисбалансів; на другому – за приведеними дисбалансами визначається початкова неврівноваженість ротору.