

И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, В.В. Фомичев

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ИССЛЕДОВАНИЯ НДС МАССИВА С УЧЕТОМ НЕПЛАНОВЫХ ОСТАНОВОК ЛАВЫ

Изложены условия повышения достоверности решения сложных геомеханических задач методом конечных элементов по расчету напряженно-деформированного состояния горного массива на концевых участках лавы с учетом неплановых ее остановок.

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ГЕОМЕХАНІЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ НДС МАСИВУ З УРАХУВАННЯМ НЕПЛАНОВИХ ЗУПИНОК ЛАВИ

Викладено умови підвищення достовірності вирішення складних геомеханічних задач методом скінченних елементів за розрахунком напружено-деформованого стану гірського масиву на кінцевих ділянках лави з урахуванням непланових її зупинок.

FUNDAMENTAL PRINCIPLES OF GEOMECHANIC MODEL PRODUCTION AND RESEARCHES OF MASSIF STRESS-STRAIN STATE INCLUDING UNSCHEDULED LONGWALL STOPS

Conditions of increase authenticity of hard geomechanical tasks solution of finite elements method on calculation strain-stress state of rock massif on ending districts of longwall with consideration of unscheduled stops are summarized.

Для повышения адекватности отражения реальных условий поддержания выемочной выработки на протяжении всего периода ее эксплуатации и достоверности выполняемых расчетов геомеханическая модель построена на следующих принципах:

– во-первых, выемочная выработка предназначена для повторного использования и срок ее эксплуатации исчисляется годами; следовательно, необходимо учитывать реологические процессы в горном массиве в обширной области ведения очистных работ, а для этого должна быть использована реологическая постановка задачи;

– во-вторых, активно действуют факторы влияния очистных работ в первой лаве,

затем длительное поддержание выемочной выработки на границе с выработанным пространством и, наконец, влияние очистных работ второй лавы – все эти факторы формируют вокруг выемочной выработки зоны аномального НДС, в которых происходит разупрочнение и разрушение массива; поэтому геомеханическая модель должна отражать состояние горной породы по полной диаграмме ее деформирования;

– в-третьих, обе вышеуказанные позиции необходимо реализовывать для каждого породного слоя и угольных пластов на значительные расстояния в кровлю, почву и бока от места ведения горных работ – здесь моделируются не только непосредст-

венная и основная кровля и почва, зоны опорного давления впереди лавы и по бокам выработки, области разгрузки в выработанном пространстве, но и вышележащие структуры плавного прогиба породных слоев без нарушения сплошности: для всей структуры углевмещающей толщи задаются реальные механические характеристики по данным геологических изысканий и лабораторных исследований;

– в-четвертых, те же требования распространяются на моделирование всех элементов крепежных и охранных систем выемочной выработки с детальным их отражением.

Сформулированные принципы обуславливают построение весьма сложной геомеханической модели с введением обширного комплекса параметров, приближающегося к ста единицам. Попытки проведения такого вычислительного эксперимента не увенчались успехом по двум причинам:

– недостаток вычислительных мощностей даже у современной компьютерной техники;

– высокая сложность отработки такой геомеханической модели, когда большой массив входящих исходных параметров обуславливает постоянные сбои в программе расчета НДС по самым разнообразным причинам.

Поэтому, для реализации задач исследований было проведено обоснование на тестовых упрощенных моделях следующей методики выполнения вычислительного эксперимента. На первом этапе анализируется так называемая макро модель в пространственной постановке с размерами не менее 60 м: по высоте углевмещающего массива (координата Y), по длине участка (координата X) и по длине лавы (координата Z). В данном объеме горного массива смоделированы: концевой участок лавы; участок выемочной выработки, включающий сопряжение с очистным забоем; участок впереди забоя лавы (зона опорного давления); участок выработанного пространства позади лавы с зонами беспоря-

дочного обрушения, шарнирно-блокового движения и плавного прогиба слоев без нарушения сплошности; участок нетронутого массива со стороны будущего выемочного столба при повторном использовании выработки. В описанной макро модели полностью реализуются первые три вышеуказанных принципа – учет реологии, полная диаграмма деформирования и реальные механические характеристики слоистого массива. Наряду с этим в макро модели введены существенные упрощения:

– во-первых, механизированная крепь очистного комплекса представлена телом в виде параллелепипеда соответствующих размеров с деформационными характеристиками, позволяющими воссоздать реальную величину сопротивления секций крепи;

– во-вторых, выемочная выработка моделируется реальной геометрией, но без установки крепежной и охранных систем.

При таких упрощениях удалось добиться стабильности проведения вычислительных экспериментов и произвести расчет НДС макро модели.

На втором этапе исследуется названная нами «подчиненная модель» с размерами по высоте $y = 60$ м, по длине выемочной выработки $x = 4$ м, по простиранию пласта (длине лавы) $z = 40$ м. Здесь основное внимание уделяется НДС массива в окрестности выемочной выработки, ее крепежной и охранных системам. Поэтому, детально моделируются все элементы поддержания выработки с учетом изменения проявлений горного давления по ее длине и появления на характерных участках новых конструктивных элементов в системах поддержания выемочной выработки. Здесь по-прежнему выполняются принципы моделирования относительно учета реологического фактора, полной диаграммы деформирования материалов и среды, оперирования реальными механическими характеристиками изучаемого объекта. Тем не менее, за счет общего сокращения размеров пространственной модели и особенно по координате X (моделируются 5 рам по длине выемочной выработки, что обосновано

вано при тестировании модели) удалось добиться стабильности выполнения расчетов. Подчиненная модель исследуется для всех характерных участков по длине выемочной выработки, для каждого из которых обосновывается, строится и обрабатывается своя геомеханическая модель.

В соответствии с изложенной методикой проведен анализ НДС макромодели для общей оценки поведения массива в районе концевой участка длины лавы, ее сопряжения с выемочной выработкой и прилегающими участками впереди и позади очистного забоя и близлежащего массива горных пород. В связи с регулярными изменениями структуры углевмещающего массива по длине выемочного участка по пл. $C_5 + C_5^g$ выбрано одно из положений лавы по координате X , а одной из главных задач в данном исследовании (помимо общей оценки НДС) является установление закономерности влияния продолжительности t остановки лавы на НДС массива в целом и особенно пород вокруг выемочной выработки. Для этого использована реологическая постановка задачи, а влияние другого основного технологического параметра – среднесуточной скорости V_c подвигания очистного забоя изучается экспериментально в шахтных условиях. Причины остановки лавы можно разделить на две группы. Первая – предусмотренная технологией очистных работ остановка механизированного комплекса для технического обслуживания и ремонта продолжительностью до одной смены (6 часов), которая, как правило, сокращается при отсутствии необходимости проведения существенных ремонтных работ в современных условиях интенсификации добычных работ. Вторая – возникновение аварийной ситуации, обусловленной геомеханическими факторами, ошибками управления механизированным комплексом и его поломками. Статистика таких аварийных ситуаций указывает на их продолжительность, превышающую 6 часов, и в среднем составляющую 12-24 часа (за исключением

посадки механизированного комплекса на «жесткую базу»). Поэтому, представляется целесообразным проследить изменение НДС окружающего массива продолжительностью остановок очистного забоя до одних суток ($t_{max} = 24$ часа).

В методологическом плане расчет изменения НДС массива производится от первой до последней секунды остановки механизированного комплекса, то есть мы можем оценить поведение окружающих пород в любой момент времени остановки комплекса. Но, чтобы не перегружать анализ обширной информацией, было принято решение выделить три значения времени среза НДС массива: $t \approx 0$ часов, $t = 12$ часов, $t = 24$ часа. Для этих значений t получены эпюры по каждой из компонент напряжений (вертикальные σ_y , горизонтальные вдоль длины выемочного участка σ_x и горизонтальные по длине лавы σ_z , интенсивность или приведенные напряжения σ), а также эпюры полных перемещений U . Для краткости изложения более подробно рассмотрена эпюра σ_y в момент остановки лавы ($t \approx 0$ часов), а развитие вертикальных напряжений с течением времени отметим только для основных особенностей изменения σ_y при разном t . При $t \approx 0$ часов наиболее важные позиции НДС макромодели заключаются в следующем.

Первая – впереди очистного забоя образуется традиционная зона опорного давления, а ее особенностью являются ограниченные размеры по длине выемочного участка (координата X) наряду с глубоким распространением в кровлю и почву пласта. Данный результат моделирования вполне согласуется с шахтными исследованиями, где отмечается, что интенсивное развитие перемещений породного контура выемочных выработок наблюдается на относительно небольшом расстоянии от груди очистного забоя – до 20-30 м. Это объясняется тем, что в Западном Донбассе со-

четание более крепкого угольного пласта и менее крепких и легко деформируемых пород кровли и почвы локализует (по координате X) зону опорного давления впереди лавы, но усиливает в ней концентрацию σ_y , опять-таки из-за высокой жесткости угольного пласта. С другой стороны, развитие зоны опорного давления в кровлю и почву пласта (по координате Y) до 20-25 м и более объясняется повышенной деформируемостью слабых слоистых пород кровли и почвы с практически полным отсутствием сцепления между слоями. Относительно концентрации σ_y в зоне опорного давления впереди лавы расчет дает следующие результаты: концентрация $\sigma_y = (2,6...3,1)\mathcal{H}$ распространяется на высоту до 9,5 м и в почву на глубину до 11,6 м; величина $\sigma_y = (4,1...4,6)\mathcal{H}$ действует в кровле на высоту до 2,7 м и в почве на глубину до 3,2 м; кроме этого, присутствуют локальные (до 0,5-0,6 м) концентрации $\sigma_y = (5,3...6,3)\mathcal{H}$, а также действуют непосредственно в районе груди очистного забоя растягивающие $\sigma_y = 0,5...1$ МПа весьма ограниченного распространения.

Вторая позиция поля σ_y – зона нагрузки непосредственно над концевыми секциями механизированной крепи и прилегающем позади них выработанном пространстве. Здесь преобладают растягивающие вертикальные напряжения, которые охватывают породы кровли и почвы как в районе концевого участка лавы, так и в районе выемочной выработки. Растягивающие $\sigma_y = 0,5...1$ МПа распространяются на высоту в кровлю 9,7-16,8 м и глубину в почву 12,2 – 21,5 м. Несмотря на небольшую величину растягивающих σ_y , они провоцируют расслоение и опускание пород кровли и поднятие пород почвы позади очистного забоя и в выемочной выработке. Более того, в непосредственной кровле и ближних породных слоях основ-

ной растягивающие σ_y развиваются до 10-15 МПа и многократно превышают сопротивление растяжению любой литологической разности в Западном Донбассе. Следовательно, в кровле происходит не только расслоение породных слоев, но и их разрушение (от растяжения) на высоту до 6-7 м, что является одним из факторов формирования нагрузки на механизированную крепь очистного забоя, крепежную и охранную системы выемочной выработки. В почве таких значений растягивающих σ_y не наблюдается, однако обширный объем пород расслаивается в первую очередь по плоскостям напластования слоев, а во вторую – возможно разупрочнение пород почвы лавы и выемочной выработки при ее обводнении, когда сопротивление породы растяжению практически исчезает и опасными становятся даже небольшие растягивающие σ_y .

Третья позиция поля σ_y – концентрация сжимающих σ_y в боках выемочной выработки. Здесь опять проявляется такая особенность, как ограниченное распространение бокового опорного давления по простиранию пласта (координата Z) и увеличенная его протяженность в породах кровли и почвы пласта. Так, если в боках выработки напряжения σ_y приходят к своему исходному состоянию \mathcal{H} уже на расстоянии 4,5-6 м, то в кровле и почве уровень $\sigma_y = (1,0...1,5)\mathcal{H}$ наблюдается на расстоянии 18-25 м. Более высокий уровень концентрации $\sigma_y = (2,6...3,1)\mathcal{H}$ распространяется в кровлю на высоту до 13,0 м и в почву на глубину до 7,6 м. Более весомую опасность для устойчивости боков выемочной выработки со стороны смежного (отрабатываемого позднее) выемочного участка представляет концентрация $\sigma_y = (4,1...4,6)\mathcal{H}$, достигающая высоты в кровле пласта 3,0 м и глубиной 1,4 м в его почве. На контуре выработки (шири-

ной 0,2–0,3 м) и по высоте ее прямолинейной части развиваются напряжения $\sigma_y = 50...70$ МПа, которые наверняка будут разрушающими. Но, если приконтурный массив будет в обводненном состоянии, то процессы его разупрочнения и разрушения распространятся на обширную область боковых пород с формированием соответствующей нагрузки на крепь. Также следует обратить внимание на изменение максимумов σ_y (на контуре) по длине выемочной выработки от 50-70 МПа на расстоянии более 11-12 м позади груди забоя до 29-33 МПа в районе сопряжения с лавой – налицо сдерживающее влияние груди забоя и подтверждение экспериментально установленным закономерностям нарастания горного давления в выемочных выработках после прохода лавы.

В зоне опорного давления впереди лавы при ее простоях до 12 и 24 часов действуют следующие тенденции:

- во-первых, снижаются размеры самой зоны по всем направлениям – например, концентрация $\sigma_y = (2,6...3,1)H$ распространяется в кровлю на высоту до 9,5 м ($t \approx 0$ час), а через 12 часов уже до 7,8 м, при $t = 24$ часа высота данной концентрации сокращается до 3,2 м;

- во-вторых, исчезают локальные аномалии растягивающих σ_y в непосредственной кровле и почве в районе груди забоя – уже при $t = 12$ час здесь действуют только сжимающие $\sigma_y = (0,4...1,0)H$, которые продолжают увеличиваться при остановке лавы на 24 часа. Таким образом, в зоне опорного давления впереди лавы наблюдается ярко выраженное реологическое явление – релаксация напряжений во времени t .

В зоне разгрузки в районе концевого участка лавы и выемочной выработки происходят следующие процессы во времени t :

- зона распространения растягивающих

σ_y в кровле постепенно увеличивается по высоте с достаточным постоянством в плоскости напластования (координаты X и Z);

- в почве выработанного пространства глубина распространения растягивающих σ_y не зависит от t , а по координатам X и Z идет небольшое сокращение этой области;

- также сокращается область распространения и величина растягивающих напряжений уровня $\sigma_y = 10...15$ МПа в непосредственной и части основной кровли и почвы с увеличением времени остановки лавы.

Следовательно, и на участке позади лавы действуют процессы релаксации напряжений, что многократно подтверждено шахтными наблюдениями.

Закономерности изменения концентрации σ_y в зоне бокового опорного давления около выемочной выработки характеризуются так:

- снижается величина концентрации сжимающих σ_y и размеры областей их распространения с увеличением времени t остановки лавы; например, концентрация $\sigma_y = (3,6...4,1)H$ уменьшается по высоте в 6,5 раз при остановке лавы на 24 часа;

- снижаются размеры действия максимумов $\sigma_y = 50...70$ МПа на контуре выработки и более протяженный участок выработки за лавой испытывает пониженные концентрации уровня $\sigma_y = 33...37$ МПа.

Таким образом, во всех аномальных зонах вокруг выемочной выработки и концевого участка лавы активно проявляется релаксация вертикальных напряжений σ_y в процессе простоя лавы, а степень позитива или негатива в проявлениях горного давления от остановки очистного забоя оценивается с учетом анализа эпюр σ_x , σ_z и σ_y , а также перемещений, результаты по которым отражены в выводах.

ВЫВОДЫ

1. Вертикальные напряжения σ_y в аномальных зонах имеют тесную связь со временем простоя лавы, выраженную в релаксации концентраций сжимающих σ_y и уменьшении по абсолютной величине растягивающих σ_y , что в совокупности снижает уровень напряженности массива по факту действия координаты σ_y .

2. Горизонтальные напряжения σ_x и σ_z проявляют неоднозначные тенденции связи со временем простоя лавы: в некоторых областях макромодели наблюдается слабовыраженная релаксация напряжений; в других областях происходит рост функций $\sigma_x(t)$ и $\sigma_z(t)$; в третьих областях компоненты σ_x и σ_z не имеют существенной связи со временем простоя лавы.

3. Приведенные напряжения σ достаточно существенно изменяются во времени t , но с противоположными тенденциями для разных типов пород: для более крепких и жестких песчаников наблюдается возрастание σ во времени t ; для более слабых и легкодеформируемых аргиллитов и алевро-

литов активно развивается релаксация напряжений.

4. Имеет место интенсивное разупрочнение пород кровли впереди лавы на расстоянии до 6-8 м, что ограничивает пролет породных консолей позади механизированной крепи и частично снижает негативный эффект посадки основной кровли.

5. Наиболее ярко проявляется реологический процесс ползучести деформаций; он негативно влияет на состояние концевых секций механизированной крепи – ведь уже в районе груди забоя опускание непосредственной кровли достигает 230-310 мм (при остановке лавы на 24 часа), в районе ограждения секций $U = 540...690$ мм, а на удалении от них в выработанное пространство опускания кровли возрастают до 1 м и более; эти процессы представляют опасность в плане посадки секций на «жесткую базу».

6. Также активно проявляется ползучесть деформаций в окрестности выемочной выработки, особенно в ее кровле (опускание до 620-800 мм) и боках (до 540-620 мм), что сопряжено с длительным простоем лавы ($t = 24$ часа) и требует разработки мероприятий для повышения устойчивости выемочной выработки.



ОБ АВТОРАХ

Ковалевская Ирина Анатольевна – д.т.н., профессор кафедры подземной разработки месторождений Национального горного университета.

Симанович Геннадий Анатольевич – д.т.н., профессор кафедры подземной разработки месторождений Национального горного университета.

Фомичев Вадим Владимирович – к.т.н., доцент кафедры подземной разработки месторождений Национального горного университета.