

ЭВРИСТИЧЕСКАЯ БЛОК-СХЕМА СВЯЗИ ПРИЗНАКОВ ЭФФЕКТА САМОРАСКЛИНИВАНИЯ ПОРОД С УСТОЙЧИВОСТЬЮ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ

По результатах комплексных досліджень розроблена евристична блок-схема зв'язку ознак ефекту саморозклинювання порід із стійкістю підготовчої виробки. Запропоновані шляхи ефективного використання ефекту.

THE HEURISTIC BLOCK DIAGRAM OF CONNECTION OF ROCKS SELF-SUPPORTING EFFECT ATTRIBUTES WITH ROADWAYS STABILITY

The heuristic block diagram of connection of attributes of rocks self-supporting effect with stability of a roadway is developed with the help of complex researches. The ways of an effective utilization of this effect are offered.

В последнее время, под руководством автора, в Горном институте Донецкого национального технического университета развивается научное направление по изучению эффекта саморасклинивания горных пород и его влияния на устойчивость подготовительной выработки. В применении к поперечному сечению выработки сущность эффекта состоит в следующем (рис. 1). Окружающие подготовительную выработку породы стремятся под действием сил горного давления смещаться, главным образом, в радиальном направлении к центру выработки. Векторы этих сдвижений на порядки превышают локальные тангенциальные, по отношению к контуру выработки, подвижки пород. В подавляющем числе случаев подземные подготовительные выработки эксплуатируются в таких горно-геологических и горнотехнических условиях, когда окружающие породы находятся в запредельном состоянии, причем зона неупругих деформаций имеет размеры, сопоставимые с диаметром выработок. В такой геомеханической ситуации, независимо от напряженно-деформированного состояния пород, одновременные радиальные перемещения всех объемов окружающих пород невозможно. Это ясно из простых геометрических соображений.

Выделим воображаемую границу окружающего массива в виде окружности 1. Если обеспечить одновременное радиальное перемещение пород к центру выработки, они переместятся в положение 2. При этом длина окружности 2 сокращается на $2\pi\delta R$, где δR – радиальное перемещение блоков породы. При радиусе зоны 6 м, в пределах которой рассматриваются перемещения, и перемещении всего 0,01 м, вдоль границы 2 возникают тангенциальные деформации порядка 0,002. Даже в разрушенных породах, модуль деформации которых уменьшается до 0,1-0,5 ГПа, такие деформации создадут дополнительные тангенциальные напряжения 2-10 МПа, что соизмеримо с прочностью массива, упрочненного цементной смесью или полимерной смолой. Несмотря на ряд допущений о равномерном смещении пород и упрощенной схеме рассуждений следует отметить, что эффект саморасклинивания скрывает весьма существенный резерв, который ранее не учитывался. В реальном массиве сдвижения происходят неравномерно, что существенно усложняет картину эффекта.

При непосредственном участии автора проведен комплекс исследований по

вопросу установления закономерностей и механизма проявления эффекта саморасклинивания горных пород (породных блоков) в окрестности подготовительной выработки [1, 2, 3]. Шахтные инструментальные наблюдения за кинематикой сдвижений вмещающих выработку пород с помощью глубинных реперов, физическое и компьютерное моделирование, а также аналитические исследования позволили определить ряд признаков и причин, как возникновения, так и развития данного эффекта.

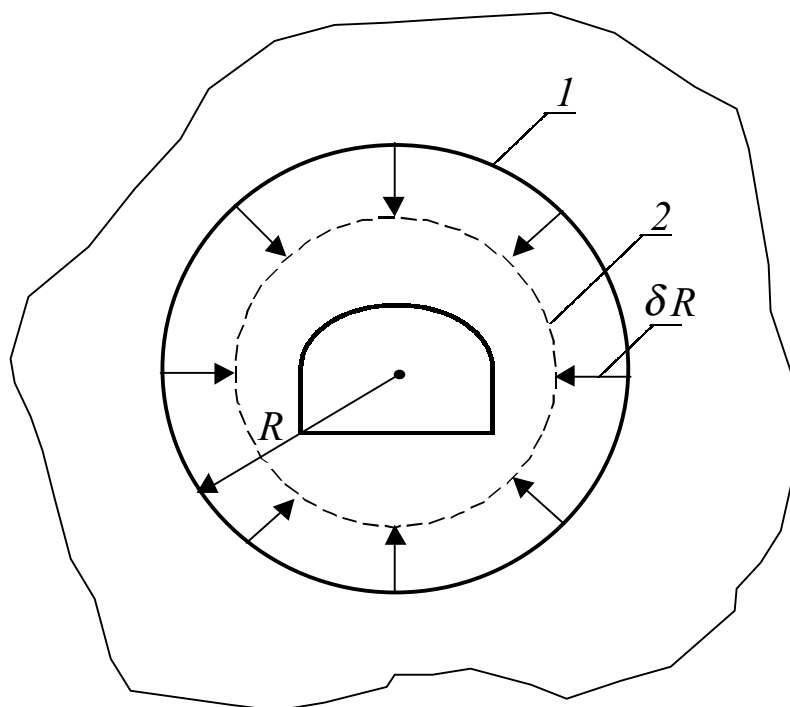


Рис. 1. - Схема, поясняющая суть реализации эффекта саморасклинивания пород при их стремлении радиально сместиться в полость выработки

Так, устойчивость полевой штрека изучалась с помощью комплексной наблюдательной станции на глубине 820 м при воздействии на выработку очистных работ в условиях шахты им. М.И. Калинина п/о «Донецкуголь». Расстояние заложения полевой штрека относительно верхней границы смежной лавы составляет 40 м. Длина смежной лавы равнялась 220 м, скорость ее подвигания 50 м/мес. Мощность пласта h_{10} в районе экспериментальной станции составляла 1,4 м. Пласт залегал в породах песчано-глинистого состава средней устойчивости. В основной почве расположен мощный слой песчаника, в котором на расстоянии 15-18 м от пласта проведен полевой штрек сечением $13,8 \text{ м}^2$. Выработка закреплена арочной податливой крепью, установленной через 0,8 м. Затяжка деревянная. Выработка в начале эксперимента находилась в весьма удовлетворительном состоянии.

В комплекс наблюдений входили измерения структурных характеристик (трещиноватости в частности) массива на обнажении боков и кровли выработки. Перед установкой глубинных реперов был проведен электрокаротаж скважин, позволивший определить исходное положение зоны первичных разрушений вокруг выработки. В скважинах было установлено 25 глубинных реперов и

четыре датчика давления. Во время проведения эксперимента измерялись относительные сдвигения глубинных реперов, конвергенция пород на контуре выработки и осуществлялась нивелировка кондукторов в субвертикальных скважинах.

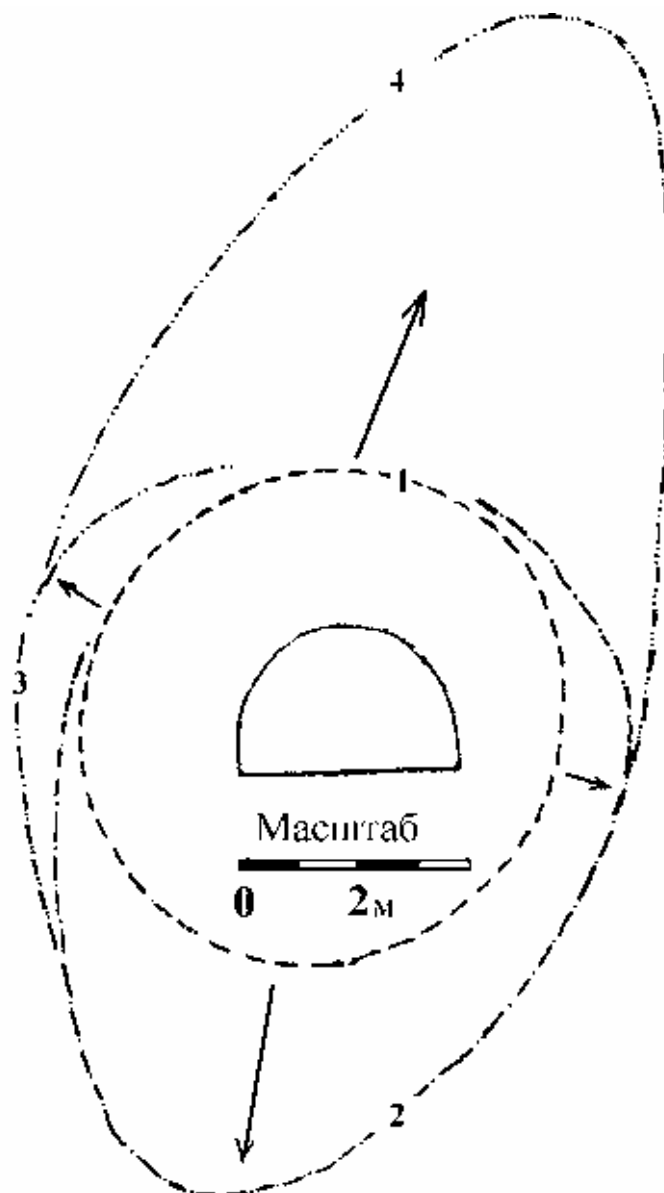
Заметное влияние смежной лавы было зарегистрировано после прохода наблюдательной станции. Влияние смежной лавы выразилось в росте дополнительного давления, которое достигло, примерно, двукратного уровня геостатических напряжений в нетронутом массиве после удаления лавы на 100 м от створа со станцией. Такой прирост напряжений вызвал интенсивное развитие зоны разрушений вокруг штрека. Разрушение фиксировали по критическим деформациям растяжения, составившим, в данном случае, 0,006. Главные закономерности развития разрушения заключались в следующем.

Рост зоны разрушений протекал в виде фронта разуплотнения, за которым оставалась зона повторно относительно сжатого ранее разрушенного массива. При перемещении лавы относительно станции на 40 м, 60 м и 115 м границы зоны разрушений остались неизменными. При этом наблюдались колебания величин и даже знаков деформаций в пределах зоны разрушений. Отметим, однако, что заметна тенденция нарастания растягивающих деформаций в еще ненарушенном массиве с одновременным возникновением зон сжатия, которые формируют сегменты и даже кольца сжатых областей, окружающих сечение выработки.

В итоге образовалась эллипсоидная зона уплотнившихся пород (рис. 2). Эта зона охватывает сечение выработки и явно выполняет стабилизирующую роль, препятствуя развитию разрушений. Этот очень важный для практики вывод отмечен на основе экспериментальных данных впервые. Он имеет большое значение при изыскании новых принципов обеспечения устойчивости выработок.

Таким образом, было установлено, что рост зоны разрушений вокруг выработки протекает в виде фронта растягивающих запредельных деформаций. За этим фронтом возникает зона относительно сжатых ранее разрушенных пород. Сжатые зоны формируют сегменты и кольца в окружающих выработку породах, что способствует стабилизации устойчивости выработки. В данном случае работает механизм самостабилизации процесса сдвижений пород по принципу Ле-Шателье, когда в среде возникают структуры, препятствующие внешним силам, нарушающим ее равновесие. Задача исследователя, таким образом, состоит в том, чтобы максимально сохранить, а может быть и усилить этот положительный эффект. В связи с тем, что рост зоны разрушений происходит не одновременно по всему фронту, а *по очереди*, имеется принципиальная возможность *избирательного* управления состоянием окружающих пород, что может существенно снизить усилия и расходы по поддержанию выработок в сложных условиях.

В качестве одного из новых направлений повышения устойчивости выработок следует рассматривать мероприятия по активному формированию, сохранению и усилению относительно сжатых колец и сегментов ранее разрушенных пород вокруг сечения подготовительной выработки.



1 – первоначальное; 2-4 – после отхода лавы на 25, 155 и 182 м соответственно
 Рис. 2. - Положение зон разрушений вокруг штрека:

Физическое моделирование кинематики и динамики движений вмещающих подготовительную выработку пород с учетом механизма их саморасклинивания выполнено на моделях из эквивалентных материалов. Характерные размеры сечения выработок составляли 4-6 м, что соответствовало типичным размерам штрека с площадью сечения в свету 13-15 м². Глубина заложения выработок изменялась от 400 м до 1200 м. Для активизации процесса разрушения пород и образования зоны неупругих деформаций осуществлялась пригрузка моделей путем увеличения нагрузки на их верхней границе.

После отработки ряда моделей получены новые данные по кинематике сдвижений и деформации вмещающих подготовительную выработку пород. При общей тенденции радиальных траекторий смещений реперов, на всем протяжении эксперимента заметна явная неравномерность сдвижений. Отмечено,

что векторы сдвижений часто отклоняются от радиального направления, причем имеет место и временная неравномерность. Другими словами отдельные смежные блоки пород двигаются в пространстве и времени неравномерно, что можно объяснить периодическим возникновением и ослаблением эффекта саморасклинивания. В тех местах, где он проявляется, траектории отклоняются от радиального сдвижения, а само сдвижение замедляется.

При дальнейшей компьютерной обработке данных было проведено дифференцирование сдвижений контурных реперов по нагрузке. Получены графики зависимости приращений полных сдвижений dU от приращений нагрузки dP , то есть от уровня приложенных граничных напряжений. Такой подход дал возможность выделить неравномерность компонент приращений сдвижений в чистом виде. При этом наблюдалась непропорциональность изменения приращений полных сдвижений реперов под нагрузкой, включающая существенные различия в направлении и темпе роста смещений. На начальном этапе пригрузки модели имело место резкое возрастание градиента смещений контурных меток, причем в среднем оно составляет 3 мм/кН. Затем у основной части реперов наблюдалось резкое уменьшение роста градиента смещений (от 3 до 1,75 мм/кН), что свидетельствует о возникновении саморасклинивания разрушенных пород. Другими словами, большинство точек одновременно двинулись в радиальном направлении в сторону полости выработки, что, естественно, привело к саморасклиниванию пород. Отметим, что этот процесс протекал уже за пределами упругости вмещающих пород. По данным четырех моделей, первый момент саморасклинивания возникает после образования вокруг выработки зоны неупругих деформаций порядка 0,2-0,6 радиуса сечения. При меньших размерах зоны эффект саморасклинивания регистрировался, однако надежность результатов измерений при этом была ниже 70%. Из этого следует, что эффект саморасклинивания может возникать на любой стадии образования и развития зоны неупругих деформаций вокруг выработки, однако он неустойчив при размерах зоны менее 0,2-0,6 радиуса сечения выработки. При больших значениях этот эффект проявляется весьма устойчиво.

Если не принимать специальных мер, обнаруженный эффект саморасклинивания исчезает из-за того, что всегда находится максимально напряженный локальный участок, который не может сохранять устойчивое равновесие длительное время.

Более детальный анализ полученных данных показал, что часть реперов двигалась в противофазе по отношению друг к другу (например, реперы №33, 42 и 40). На рис. 3 представлены кривые графиков противофазно движущихся реперов. График построен с усреднением данных полных сдвижений для более четкого прослеживания противофазности сдвижений реперов. Противофазное движение реперов на этом этапе не было случайным. Как оказалось, данные реперы находились в соседних блоках моделируемых пород. Противофазность их сдвижений однозначно подтверждает объективность возникновения эффекта саморасклинивания пород в этих местах. Это значит, что система “крепь-окружающие породы” сама отбирает критическое место, в котором соседние блоки дают возможность двигаться в стесненных условиях *по очереди*, перио-

дически создавая расклинивающий эффект, который распространяется на оставшиеся окружающие выработку породы. Отсюда вытекает локальность исследуемого эффекта, указывающая на конкретное место его возникновения. В нашем случае это место находится на расстоянии 1,3 м от начального положения сечения выработки в правом замке свода кровли. Именно в этом блоке зарождается эффект саморасклинивания, который запускает процесс формирования сегментов и колец ранее разрушенных пород, охватывающих сечение подготовительной выработки. Противофазность или поочередность движения блоков массива наблюдается в почве выработки, а также и в ее боках.

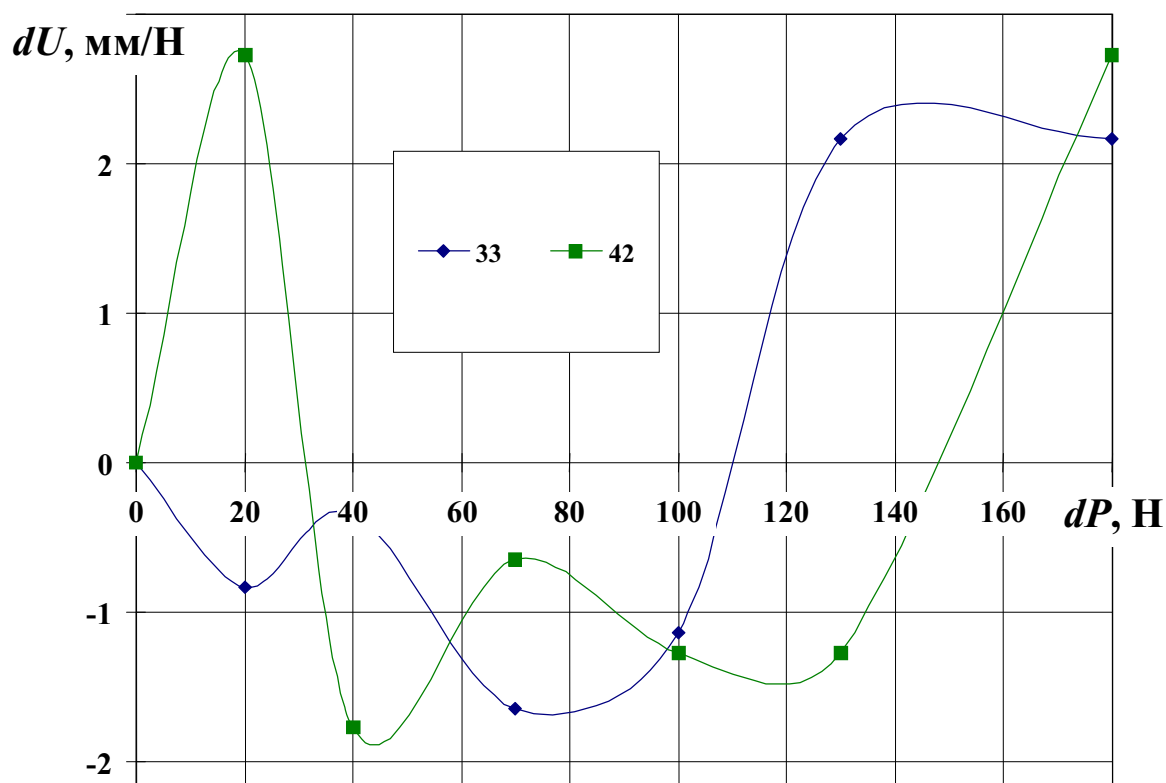


Рис. 3. - Противофазное распределение полных сдвигов реперов

Таким образом, механизм эффекта саморасклинивания пород при их смещении в полость выработки заключается в следующем: смещение вмещающих подготовительную выработку пород происходит, в целом, в радиальном направлении по отношению к центру сечения выработки. После достижения предельного состояния и образования зоны неупругих деформаций размером 0,2-0,6 и более радиуса сечения выработки наблюдается первый устойчивый эффект саморасклинивания пород, стремящихся одновременно смещаться в радиальном направлении к центру сечения выработки. При этом интенсивность смещений резко затухает, уменьшаясь, по крайней мере, в несколько раз. Однако под действием максимальных напряжений в наиболее напряженных локальных зонах происходит потеря устойчивого равновесия и эффект саморасклинивания исчезает или ослабляется, причем большинство разрушенных породных блоков начинает интенсивно смещаться в сторону полости выработки. Указанная последовательность повторяется периодически несколько раз. Установлено,

что в зоне зарождения эффекта саморасклинивания породные блоки смещаются поочередно. Если один из блоков ускоряет интенсивность смещения, соседний замедляет, пропуская первый блок вперед. Поочередный характер смещений породных блоков в очаге зоны саморасклинивания является одной из типичных особенностей проявления данного механизма сдвижений.

Численное компьютерное моделирование напряженного состояния вокруг выработки арочного сечения шириной 5 м и высотой 3,5 м, подкрепленной податливой крепью, производилось методом конечных элементов. Выработка была расположена в песчано-глинистых породах горизонтального залегания. Модуль упругости 30-10 ГПа, коэффициент Пуассона 0,26, прочность на одноосное сжатие 30-50 МПа. Сцепление составляло 1,5 МПа, угол внутреннего трения 30-40°, глубина заложения выработки составляла 800 м. Расчетная схема была разбита на 900 конечных элементов.

Критическим местом, с точки зрения устойчивости выработки, являются, как правило, кровля и почва. В этих зонах эффект саморасклинивания определяется, в первую очередь, горизонтальной компонентой сдвижений. Как и следовало ожидать, распределение симметрично относительно вертикальной оси симметрии сечения выработки. Породы в кровле и почве стремятся переместиться к центру сечения. В боках под действием опорного давления породы отжимаются в сторону окружающего массива. В левом и правом секторах кровли отмечаются максимумы сдвижений, достигающих 7 мм. Эти максимумы расположены на расстоянии 1,5 м от контура выработки. В почве такие максимумы не превышают 5,4 мм и расположены на расстоянии 2,5-4 м от контура. Надо полагать, что эти точки могут быть местами, где зарождаются эффекты саморасклинивания пород. В конечном счете, важно доказать, что в таких критических местах прочность породы увеличивается.

На рис. 4 приведены совместные распределения главных нормальных компонент напряжений в кровле, боках и почве и нанесены линии локальных оптимумов распределения горизонтальных перемещений.

В почве наблюдается сложная конфигурация оптимумов. Так, в непосредственной близости к ней проходит линия, где максимумы горизонтальных сдвижений направлены от центра выработки в сторону боковых пород. Следовательно, почва в этом месте испытывает растяжения, что подтверждается распределением главных компонент нормальных напряжений: $\sigma_3 = -2,7$ МПа, $\sigma_1 = -1,2$ МПа. Ясно, что при таком соотношении компонент порода склонна к интенсивному разрушению от растягивающих напряжений. Саморасклинивание в данной ситуации невозможно. По мере удаления в почву происходит изменение знака горизонтальных сдвижений - они направлены к центру выработки. Начиная с глубины 2,5 м линия максимумов сдвижений обретает стабильный характер. Именно в этом месте наблюдаем минимальную разницу между главными нормальными компонентами напряжений: $\sigma_3 = 9-10$ МПа, $\sigma_1 = 11$ МПа. При таком соотношении нормальных компонент прочность породы будет максимальна при прочих равных условиях.

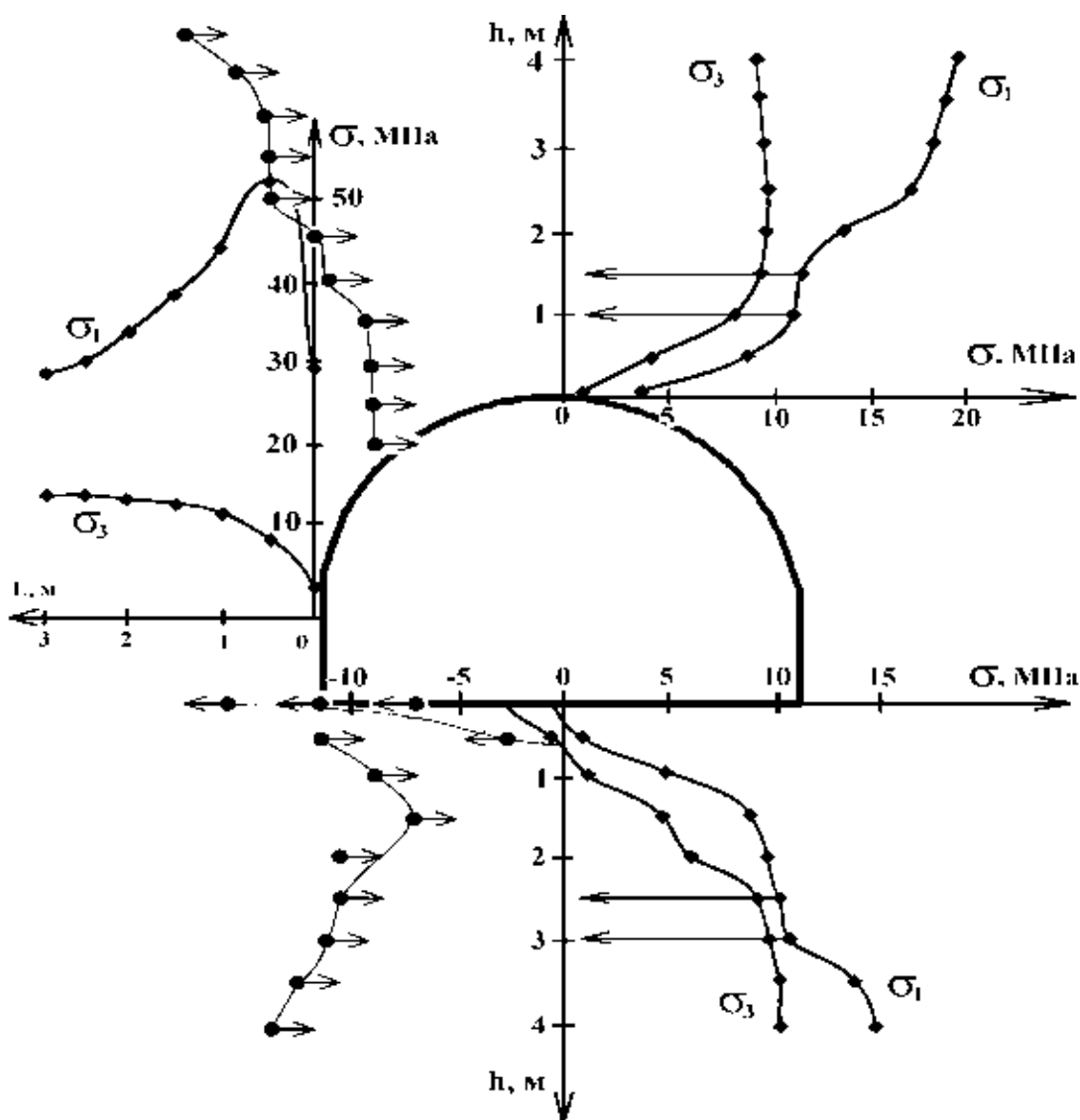


Рис. 4. - Совместное распределение нормальных напряжений и особых точек распределения горизонтальных перемещений в окрестности подготовительной выработки

Следовательно, эффект саморасклинивания пород объясняется совместным влиянием их радиальных перемещений к центру выработки и выравниванием главных нормальных сжимающих компонент напряжений. Именно в тех местах, где происходит такое совпадение, порода саморасклинивается, что повышает ее прочность и, как следствие, устойчивость выработки. Сказанное подтверждается для пород кровли, где эффекты сближения сжимающих компонент и стабилизации линии оптимумов горизонтальных сдвижений совпадают на высоте 1,5 м от кровли выработки. Здесь $\sigma_3=7,5-9$ МПа, $\sigma_1=12,5$ МПа. Ближе к контуру компоненты, хотя и имеют положительный знак (сжимающие), разница между ними гораздо больше: $\sigma_3 < \sigma_1$ в 2-5 раз. Такое их соотношение не благоприятствует увеличению прочности пород.

Таким образом, получено объяснение механизма саморасклинивания пород вокруг подготовительной выработки, состоящего в выравнивании главных нормальных сжимающих компонент напряжений на расстоянии радиуса сече-

ния в кровле и 1,7-2 радиусов в почве для арочного сечения выработки на первоначальном этапе разрушения вмещающих пород. При дальнейшем развитии процесса разрушения возникают новые кольца или сегменты саморасклинившихся пород, где в результате перераспределения напряжений происходит сближение главных нормальных сжимающих компонент.

Исследования автором проблемы потери устойчивости подготовительной выработкой показали ее четкую взаимосвязь с саморасклиниванием пород. Установлено, что во время проявления эффекта саморасклинивания устойчивость породного контура выработки может существенно увеличиться, что является положительным фактором. Однако неуправляемый эффект саморасклинивания характеризуется непостоянством во времени в результате поочередности сдвижения породных блоков под действием горного давления. В такие моменты устойчивость выработки может резко и даже критически ухудшиться.

Эти неоднозначные особенности исследуемого эффекта саморасклинивания побудили автора к их тщательному анализу и упорядочиванию по характеру и степени влияния на устойчивость подготовительной выработки. В результате разработана эвристическая блок-схема связи между признаками, причинами возникновения эффекта саморасклинивания вмещающих пород и влиянием этих факторов на устойчивость подготовительной выработки (рис. 5). На схеме блоки с факторами, оказывающими положительное влияние на эффект саморасклинивания, отмечены знаком «+», а отрицательное – знаком «-». Можно видеть, что одновременные радиальные смещения вмещающих пород (блоки диаграммы 2, 3) непосредственно приводят к эффекту их саморасклинивания и уменьшению интенсивности смещений (блоки 13, 14). Кроме этого, одновременные радиальные смещения пород приводят к росту нормальных компонент напряжений и сближению их величин (блок 5), что порождает увеличение прочности вмещающих пород (блок 19, 20, 22).

Наоборот, поочередное смещение вмещающих пород порождает поочередное смещение соседних породных блоков (блок 4), что влечет за собой зарождение и развитие породной складки (блок 6), в форме которой происходит исчезновение эффекта саморасклинивания и потеря устойчивости выработки (блоки 15, 18, 21). В конечном счете, поочередные радиальные смещения взаимно связаны и взаимообусловлены с поочередным развитием зоны разрушения в различных направлениях (блоки 7 и 2). В результате процесс разрушения идет по менее энергоемкому пути, когда разрушение пород протекает в несколько последовательных этапов, по частям (блок 12). Эти факторы отрицательно влияют на устойчивость породного контура выработки, уменьшая или полностью ликвидируя эффект саморасклинивания.

Руководствуясь предложенной блок-схемой, можно определить следующие основные пути для возбуждения, сохранения и эффективного использования эффекта саморасклинивания горных пород для обеспечения устойчивости подготовительной выработки:

- В поперечном сечении выработки необходимо обеспечивать одновременность радиальных сдвижений пород в ее полость.

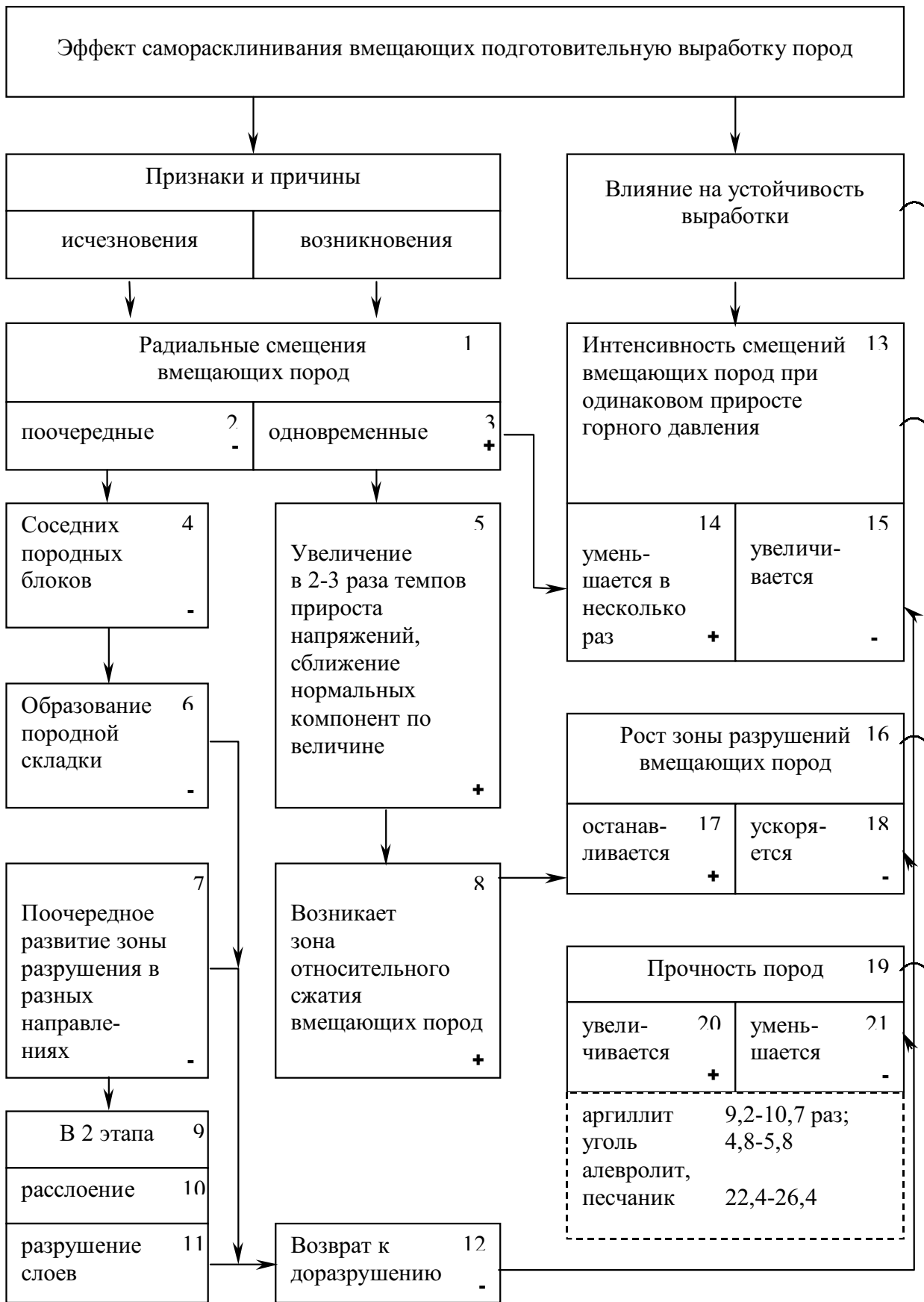


Рис. 5. - Эвристическая блок-схема связи между признаками, причинами возникновения эффекта саморасклинивания вмещающих пород и влиянием этих факторов на устойчивость подготовительной выработки

- Способствовать увеличению сжимающих напряжений с одновременным выравниванием главных нормальных компонент в критических зонах, что окажет положительное влияние через механизм повышения прочности пород.
- Создавать и сохранять зоны относительного сжатия пород в окружающем массиве.
- Препятствовать зарождению и развитию породной складки.
- Устранять возможность поочередного развития зоны разрушения вокруг выработки в разных направлениях, а также возможность повторных доразрушений ранее разрушенного массива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров С.Н., Лаптеев А.А., Назимко В.В., Сажнев В.П. Численное моделирование увеличения несущей способности вмещающих выработку пород за счет эффекта их саморасклинивания // Известия донецкого горного института. - 1996. - №2. - С. 67-70.
2. S.N. Alexandrov, S.V. Naprasnikov, V.V. Nazimko, V.P. Sazhnev Stabilization of ground movement with yield rock bolts using spatial effect. - Dnipropetrovsk: NMUU, 1999. – pp. 261-264.
3. С.М. Александров, В.П. Сажнев, Красько М.І., Напрасніков С.В. Аналіз закономірностей розвитку зон руйнування навколо підготовчої виробки при впливі очисних робіт з урахуванням ефекту саморозклинювання порід // Проблеми гірського тиску. – Донецьк: “СПЕКТР”. – 2001. – №6. – С. 48–72.

УДК 622.834.53

М.И. Бугара, В.А. Коломиец

АНАЛИЗ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Розглядається питання нерівномірності зсувань земної поверхні при підземному вийманні вугілля. Показано, що вони суттєво коливаються відносно детермінованих значень, які встановлюються нормативною методикою.

ANALYSIS OF SURFACE SUBSIDENCE ACTUAL MEASUREMENTS

It was discovered that actual subsidence deviate from determine trend essentially.

Ведение подземных горных работ неизбежно приводит к смещениям земной поверхности. Существующая нормативная методика [1] определяет мульду сдвижений как плавную кривую линию. Однако практика наблюдения за земной поверхностью показывает, что реально образующаяся мульда сдвижений не является идеальной линией. Это в первую очередь вызвано неравномерностью распределения физико-механических свойств горных пород в массиве, а также неравномерностью параметров залегания горных пород, что исследовалось в работах [2, 3].

В данной работе рассматриваются результаты натуральных наблюдений, которые проводились на земной поверхности в процессе отработки 2-й, 1-й и 4-й восточной лавы пласта с₁₁ шахты «Южнодонецкая №1». Наблюдательная станция располагалась вдоль железнодорожной ветки, которая идет к погрузочному пункту шахты (рис. 1). Прежде чем анализировать экспериментальные результаты, необходимо отметить особенности обработки данных измерений. Для этого еще раз, обратив внимание на рис. 1, отметим, что реперная линия была