

УДК 622.831

П.В. Макаров, И.Ю. Смолин, Е.П. Евтушенко

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына

ОАО «НЦ ВостНИИ»

С.П. Ворошилов

НП «Кузбасс-ЦОТ»

Моделирование поведения геосреды при ведении горных работ

Рассмотрена задача о накоплении повреждений и обрушении кровли над горной выработкой с точки зрения развиваемого авторами эволюционного подхода. Нагружаемая полем сил тяжести геосреда рассматривается как нелинейная динамическая блочная система, эволюционирующая по законам синергетики. Определяющие соотношения, записанные в скоростной форме в виде двух групп эволюционных уравнений, обеспечивают конкуренцию положительных и отрицательных обратных связей в такой нелинейной системе, как прочная сплошная среда с эффектами внутреннего трения и дилатансии. Выполненные на высокопроизводительном кластере СКИФ-Cyberia расчеты показали, что меняя нелинейные характеристики среды можно получить как вязкий, так и хрупкий режим разрушения, стационарный и сугубо неравновесный режимы обрушения кровли

1 Введение. Эволюционная точка зрения на процессы деструкции в геосредах

Различные подземные полости антропогенного происхождения (горные выработки, подземные сооружения) могут представлять серьезную угрозу как для наземных сооружений, так и для безопасного ведения горных работ. Поэтому одной из актуальных проблем является задача управления кровлей в забоях угольных шахт. В последнее десятилетие эта проблема стала особенно острой в связи со значительным увеличением нагрузок на забои. Высокие скорости их подвигания приводят к тому, что горный массив вокруг выработки и особенно в породах кровли оказывается в существенно неравновесном и неустойчивом состоянии [1]. Это приводит к зависанию протяженных участков кровли. Значительное возрастание шагов первой посадки кровли (до 100 м и более) и последующих посадок (до нескольких десятков метров) грозит катастрофическими неуправляемыми обрушениями кровли и представляет серьезную угрозу безопасности при ведении горных работ. Наряду с уже разработанными технологическими способами и приемами управления кровлей вблизи очистного забоя [2], [3], понимание основных закономерностей эволюции гор-

ного массива вокруг выработки и возможных сценариев развития событий в сверхбыстрых, катастрофических режимах (обрушений кровли, различных горных обвалов, формирование макроскопических разрывов и т.д.) представляет собой актуальную фундаментальную задачу геомеханики, решение которой должно стать научной основой для многих горных технологий.

Механическое поведение кровли над выработанным пространством и всего горного массива вокруг выработки, включая все значимые элементы геосреды, авторы рассматривают с эволюционной точки зрения [4]–[6]. Согласно развиваемому подходу, геосреда в поле сил тяжести, а также при других возможных силовых воздействиях эволюционирует по законам общей теории эволюции, которая к настоящему времени формируется в рамках нелинейной динамики или синергетики [4]–[6]. Однако привлечение уже ставших традиционными методов и подходов нелинейной динамики, которые основываются на анализе общих свойств решений базовых уравнений синергетики, оказалось практически малоэффективным для выяснения сценариев эволюции конкретных физических и природных систем. И это понятно, базовые уравнения синергетики не являются математическими моделями изучаемых систем, а схожесть общих закономерностей любого эволюционного процесса ничего нам не говорит о конкретном эволюционном сценарии исследуемой системы. Следовательно, для каждого физического или природного процесса должна быть создана оригинальная эволюционная модель, которая детально описывает изучаемый процесс.

В работах [4]–[6] показано, что если задача моделирования физического процесса сформулирована как эволюционная, то в силу общности характерных свойств решений систем нелинейных уравнений и решения этой задачи, а в более общем случае уравнений математической физики, в частности уравнений механики сплошных сред, выражающих законы сохранения, вместе с нелинейными определяющими уравнениями первой и второй группы (эволюционными уравнениями), проявляются все свойства решений нелинейных динамических систем, а также качественные закономерности, достаточно подробно изученные при анализе общих решений базовых уравнений синергетики. Это, прежде всего, иерархичность и многомасштабность изучаемых физических и природных процессов, масштабная инвариантность, самоподобие или самоафинность, пространственная локализация распределений параметров (деформаций и повреждений при развитии деформационных процессов), пороговость физических и природных явлений, когда, например, при переходе на новый масштаб разрушения должен быть преодолен характерный энергетический порог; неравномерность процессов эволюции во времени – наличие медленной квазистационарной стадии и последующая сверхбыстрая эволюция в режиме с обострением и т.д. [4]–[9]. Также было показано, что решения соответствующих уравнений механики деформируемого твердого тела демонстрируют все или некоторые из перечисленных особенностей только в том случае, когда задача сформулирована как эволюционная и граничные условия, например, условия нагружения, обеспечивают для управляющих параметров достижение ими пороговых значений, при превышении которых в системе наблюдаются изменения пространственно-временной симметрии в распределениях параметров, т.е. происходит самоорганизация – образование новых нестационарных диссипативных структур [4], [5].

В работе [1] предложено решение задачи об обрушении кровли как задачи эволюционной, подобраны скорости накопления повреждений на рассматриваемых пространственно-временных масштабах, что обеспечило приемлемое согласие с натурными данными. В настоящей работе развивается эта концепция.

Основные задачи настоящего исследования носят также в основном методический характер, хотя параметры, обеспечивающие эволюцию геосреды в поле сил тяжести, подбирались по возможности в соответствии с данными по посадкам кровли для реальных забоев Кузбасса [1].

Цели работы сформулируем как следующие:

– продемонстрировать универсальность предлагаемого подхода для описания эволюции как вязкопластичных, так и хрупких сред. Другими словами, предлагаемая модель нагружаемой геосреды описывает как хрупкую реакцию на воздействия, так и пластические свойства в зависимости от условий нагружения. Таким образом, математическая модель эволюции геосреды допускает возможность реализации этих сценариев в зависимости от управляющих параметров и нелинейных свойств геосреды;

– обсудить роль дилатансии в формировании напряженно-деформированного состояния в нагружаемой геосреде;

– привести примеры численного решения задачи об эволюции повреждений в горном массиве вокруг выработки и обрушений кровли для двух режимов: равновесного и существенно неравновесного, приводящего к катастрофическому обрушению протяженных участков кровли.

Основное внимание в работе уделяется общей феноменологии явления без привязки к разнообразным физическим процессам и механизмам, могущим оказать кардинальное влияние на реализацию конкретного сценария эволюции или смену эволюционных сценариев. Например, обводненность среды, наличие разломов, слоистость, другая исходная структурная неоднородность и т.д. могут быть в дальнейшем учтены при решении конкретных прикладных задач в рамках развиваемой концепции.

Отметим также следующий фундаментальный аспект, кардинально меняющий сценарий разрушения при решении задачи с позиций развиваемого подхода в отличие от традиционного усредненного макроскопического описания. С позиций традиционной макроскопической точки зрения, сплошная деформируемая среда представляет собой один заранее выбранный (продиктованный решаемой задачей) уровень или масштаб макроскопического феноменологического описания вне зависимости от физического содержания и механизмов, которые могут быть отражены в уравнениях состояния. Эволюционная точка зрения изначально предполагает наличие в среде иерархии масштабов [1], [4], [5], которые и выявляются в среде по мере развития деформационных процессов, формируя в нагружаемом материале иерархии нестационарных диссипативных структур, например, систем трещин разных порядков в хрупком материале или иерархию сравнительно слабдеформированных блоков, разделенных системами сопряженных полос локализованной деформации [4], [5]. Понятно, что при численном моделировании минимальные размеры таких структурных элементов ограничены возможностями счета (дискретными шагами по пространству). Другими словами, эволюционный подход описывает процессы самоорганизации – формирование в нагружаемой геосреде новых нестационарных структур, их взаимодействия и трансформации. Эти структуры не могут быть навязаны среде извне, а генетически присущи самой нелинейной среде. По этой причине нелинейные определяющие уравнения включают две группы: первая группа определяющих уравнений выражает связи между макропараметрами; вторая группа эволюционных уравнений представляет собой кинетические уравнения, задающие генерацию параметров в зависимости от событий микроуровня. Таким образом, в нагружаемой геосреде, в том числе и первоначально структурно-неоднородной, формируется неоднородное распределение

параметров. Эти неоднородности образуются в среде в силу внутренних причин – нелинейных свойств среды, а не в силу специально подобранных условий нагружения. Это и есть по И. Пригожину [7] диссипативные структуры.

2 Математическая постановка задачи об эволюции нагружаемой геосреды

Следуя работам [1], [4], [5], выпишем систему уравнений механики твердого деформируемого тела, которая вместе с определяющими или эволюционными уравнениями является в общем случае нелинейной и открытой. Она описывает эволюцию любых твердых тел, в том числе и нагружаемой геосреды. Связь этой открытой нелинейной системы с внешним миром осуществляется через управляющие параметры, которые совместно с граничными условиями (их также в ряде случаев можно причислить к управляющим параметрам) определяют условия нагружения исследуемого объема геосреды [1], [4], [5].

Такая эволюционирующая открытая система будет способна к самоорганизации только в том случае, если в ней имеются объемные, распределенные в пространстве источники, способные генерировать и перераспределять неоднородности в распределении параметров, фактически формировать новые и трансформировать уже имеющиеся структуры: тепло (тепловые структуры [7]), дефекты и повреждения в деформируемых твердых телах [4] и т.д. Диссипативные нестационарные структуры, способные к развитию и приводящие к усложнению и совершенствованию системы, т.е. ее адаптации к внешним воздействиям, формируются источниками [8], в то время как на стоках возможно формирование только стационарных структур [4], [8]. По этой причине деформируемое твердое тело – это идеальная среда, способная к самоорганизации, так как в ней под приложенными воздействиями генерируются различные дефекты и повреждения разных масштабов [4]. Движущими силами эволюции геосреды являются сила тяжести и внутреннее тепло. Для решения задачи эволюции горного массива вокруг выработки ограничимся только гравитацией.

Таким образом, полная система нелинейных уравнений при лагранжевом подходе к описанию движения сплошной среды включает:

уравнения, выражающие законы сохранения

$$\rho V = \rho_0 V_0, \quad \rho \dot{v}_i = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x^j} + \rho F_i, \quad \rho \dot{E} = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - \frac{\partial q_i}{\partial x^i}; \quad (1)$$

эволюционные определяющие уравнения первой группы

$$\dot{\sigma}_{ij}^J = \lambda (\dot{\theta}^T - \dot{\theta}^P) \delta_{ij} + 2\mu (\dot{\epsilon}_{ij}^T - \dot{\epsilon}_{ij}^P), \quad (2)$$

эволюционные уравнения второй группы

$$\dot{\theta}^P = A \frac{\partial}{\partial x^i} B \frac{\partial}{\partial x^i} \theta^P + C(\theta), \quad \dot{\epsilon}_{ij}^P = F(\dot{\epsilon}_{eff}^P, \sigma_{eff}^P, S_{ij}). \quad (3)$$

Здесь ρ_0, ρ — начальное и текущее значение плотности материала; V_0, V — начальное и текущее значение объема некоторой частицы материала; x^i — координаты в декартовой системе координат наблюдателя; v_i — компоненты вектора скорости перемещений; σ_{ij} — компоненты тензора напряжений; F_i — компоненты вектора массовых сил; $\dot{\epsilon}_{ij}^T = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x^j} + \frac{\partial v_j}{\partial x^i} \right)$ — компоненты

тензора скорости деформации; E — внутренняя энергия единицы начального объема; q_i — компоненты вектора теплового потока; точка над символом означает материальную производную по времени. Используется разложение полной скорости деформации на упругую и неупругую составляющие $\dot{\varepsilon}_{ij}^T = \dot{\varepsilon}_{ij}^E + \dot{\varepsilon}_{ij}^P$. Для учета независимости от жесткого вращательного движения производная по времени от напряжений записана в форме коротационной производной Яуманна $\dot{\sigma}_{ij}^J = \dot{\sigma}_{ij} + \sigma_{ik}\dot{\omega}_{kj} - \sigma_{kj}\dot{\omega}_{ik}$, где $\dot{\omega}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x^j} - \frac{\partial v_j}{\partial x^i}\right)$ — компоненты тензора скорости вращения (вихря). A, B, C, F — некоторые функции, определяемые при конкретном задании кинетик (3). Используются также следующие обозначения:

$$\dot{\theta}^T = \dot{\varepsilon}_{ii}^T, \quad \dot{\theta}^P = \dot{\varepsilon}_{ii}^P, \quad \dot{\varepsilon}_{eff}^P = \sqrt{\frac{4}{3}J_2^P} = \sqrt{\frac{2}{3}\dot{\varepsilon}_{ij}^P\dot{\varepsilon}_{ij}^P}, \quad \dot{\varepsilon}_{ij}^P = \dot{\varepsilon}_{ij}^P - \frac{1}{3}\dot{\theta}^P\delta_{ij},$$

$$\sigma_{eff} = \sqrt{3J_2} = \sqrt{\frac{3}{2}S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} = \sigma_{ij} + P\delta_{ij}, \quad -P = \frac{1}{3}\sigma_{ii},$$

где $\dot{\varepsilon}_{ij}^P$ — компоненты деватора тензора скорости пластических деформаций; S_{ij} — компоненты деватора тензора напряжений; P — среднее давление; δ_{ij} — символ Кронеккера.

Эволюционные уравнения первой группы (2) записаны в релаксационной форме и выполняют несколько важнейших функций в развитии эволюционного процесса:

1 Упругие напряжения растут в каждой локальной точке нагружаемой среды пропорционально росту полных скоростей деформации $\dot{\varepsilon}_{ij}^T$, т.е. в соответствии со скоростью нагружения среды. Такое нагружение может быть осуществлено либо непосредственным заданием полной скорости деформирования $\dot{\varepsilon}_{ij}^T$, либо косвенно через приложенные массовые и поверхностные силы и перераспределения параметров в соответствии с развитием течения среды, определяемом законами сохранения (1). Именно в этом смысле скорости полных деформаций $\dot{\varepsilon}_{ij}^T$ выполняют роль управляющих параметров, согласно терминологии Г. Николиса и И. Пригожина [7]. В любом случае, внутри расчетной области они сложным образом зависят от параметров течения среды.

2 Релаксируют напряжения в соответствии с развитием неупругих реакций в нагружаемой среде $\dot{\varepsilon}_{ij}^P$. Следовательно, релаксационные определяющие уравнения первой группы обеспечивают установление в каждой точке деформируемой среды динамического равновесия между внешними воздействиями и откликом среды на нагружение.

3 Через релаксационные определяющие уравнения первой группы реализуются отрицательные и положительные обратные связи. Отрицательная обратная связь реализуется через закон релаксации и стабилизирует деформационный процесс, выравнивая неоднородности. Действительно, чем выше напряжения, тем выше скорость генерации неупругих сдвигов и повреждений, а значит и выше скорость релаксации (2). С уменьшением напряжений уменьшается и генерация повреждений и сдвигов. Процесс стабилизируется в состоянии динамического равновесия в данной частице среды, из которого его может вывести, например, изменение полной скорости дефор-

мации $\dot{\varepsilon}_{ij}^T$, как управляющего параметра. Понятно, что эта стабилизация определяется не только скоростью генерации неупругих деформаций и повреждений, а также механизмами упрочнения и деградации физико-механических характеристик среды, о чем будет сказано далее. Положительная обратная связь не только разгоняет автокаталитический процесс деградации прочностных характеристик среды – локализация неупругих деформаций (повреждений) снижает прочностные характеристики среды в этих локальных областях, что в свою очередь, усиливает в них процессы локализации, – но и выполняет созидательную роль, формируя в среде новые диссипативные деформационные структуры [4], [8].

Эволюционные уравнения второй группы (3) отражают реакцию среды на нагружение. В то время как полные скорости деформации $\dot{\varepsilon}_{ij}^T$, так или иначе, определяются условиями нагружения, $\dot{\varepsilon}_{ij}^P$ и $\dot{\theta}^P$ зависят только от внутренних свойств среды и есть результат работы распределенных объемных источников, генерирующих в среде дефекты. Кинетические уравнения (3) интегрально отражают масштабы микроуровня и определяют возможности среды перераспределять и диссипировать подводимую к ней энергию. В этом смысле они отвечают за способность нагружаемой среды к формированию в ней диссипативных нестационарных структур, т.е. за самоорганизацию. В этом и заключается созидательная роль положительной обратной связи [8].

С другой стороны, эволюционные уравнения второй группы описывают процессы накопления в среде дефектов и повреждений, и тем самым полностью определяют деградацию физико-механических свойств среды. Входя в эволюционные уравнения первой группы (2), $\dot{\varepsilon}_{ij}^P$ и $\dot{\theta}^P$ участвуют в игре между положительными и отрицательными обратными связями, определяя эволюционные сценарии.

Модель нагружаемой геосреды обсуждена в работах [1], [4], [5] и учитывает внутреннее трение, дилатансию, накопление повреждений и деградацию прочностных характеристик геосреды. Предельная поверхность перехода от упругой реакции среды к неупругому поведению определена по модели В.Н. Николаевского [9]

$$\frac{\alpha}{3} J_1 + J_2^{1/2} = Y, \quad \dot{\theta}^P \equiv \dot{I}_1^P = 2\Lambda \dot{I}_2^{P/2} = 3\Lambda \dot{\varepsilon}_{eff}^P, \quad (4)$$

где α – коэффициент внутреннего трения; Λ – коэффициент дилатансии.

Изменения прочностных параметров модели описываются следующими уравнениями [1], [5]:

$$Y = Y_0(1 + A(e) - D_e(e))(1 - D(\sigma)), \quad A(e) = 2h \frac{e}{e^*}, \quad D_e(e) = 2h \left(\frac{e}{e^*} \right)^2 = A(e) \frac{e}{e^*},$$

$$D(\sigma) = \int \frac{(\sigma - \sigma_0)^n}{(\sigma^*)^n t^*} dt \quad \text{для } \sigma > \sigma_0 \quad (5)$$

Здесь h – параметр модели, отвечающий за упрочнение; $e = 2I_2^P/2 = 3\varepsilon_{eff}^P$ – накопленная пластическая деформация (параметр Одквиста); e^* – критическая деформация, после достижения которой преобладает деградация материала; σ – эффективное напряжение, а σ_0 , σ^* , t^* и $n = 2$ – параметры модели, определяющие пороговое напряжение, с которого начинают накапливаться по-

вреждения, предельное напряжение и скорость процесса накопления повреждений; $D(\sigma)$ — поврежденность среды.

Усечение предельной поверхности в области растяжения также определяется с учетом повреждений и отражает различие прочностных свойств геосреды при сжатии и растяжении. Фактически среда всегда разрушается в области растягивающих напряжений, абсолютная величина которых невелика и уменьшается с ростом поврежденности среды:

$$P^* = P_0^*(1 - D(\sigma)). \quad (6)$$

Таким образом, принимается, что разрушение и раскрытие трещин происходит при наличии растягивающих напряжений, которые присутствуют в локальных областях неоднородной среды практически при любом виде нагрузок.

Выбор степенных зависимостей в выражениях (5) был продиктован соображениями, связанными с изучением локализации и образованием тепловых структур и глубоким замечанием С.П. Курдюмова о том, что не любая нелинейность приводит к возникновению структур, т.е. к самоорганизации. Сложные нестационарные структуры формируются в среде со степенными источниками. При других видах нелинейностей задача часто вырождается при приближении к моменту обострения [8]. Степенные зависимости в законах накопления повреждений следуют также из идеи самоподобия (или самоафинности) [10], [11].

Реальное время эволюционного процесса T существенно больше возможного времени t непосредственно счета [1]. В данном случае T задается характерными временами подвигания забоя. За время ΔT_i забой продвигается на один дискретный пространственный интервал Δx . Шаг по времени процесса ΔT_i выбирается из условия:

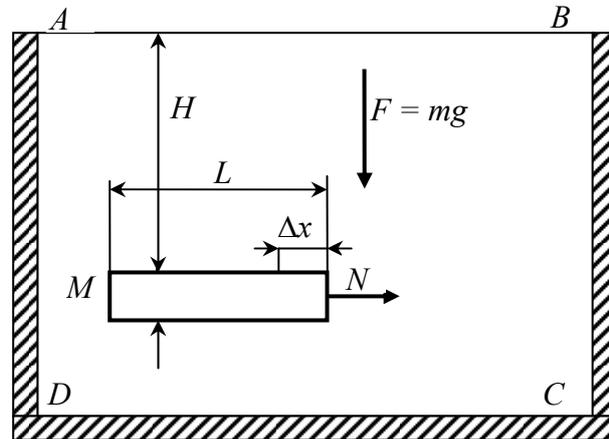
$$\Delta T_i = \frac{nL}{c}, \quad (7)$$

где $n = 3$; L – размер расчетной области; c – скорость звука в геосреде. Условие (7) обеспечивает установление в геосреде практически стационарного распределения параметров после малого возмущения, вызванного увеличением выработанного пространства. Скорости накопления повреждений в геосреде выбираются по тестовым расчетам в соответствии с известными данными по реальным временам посадки кровли [1], которые составляют от нескольких дней до десятков дней.

3 Примеры численного решения задачи об обрушениях кровли

Одной из фундаментальных проблем геомеханики, которая пока не нашла должного объяснения, является проблема изменения отклика геосреды от вязкой реакции до хрупкого поведения в зависимости от условий нагружения [12], [13]. Такое поведение геосреды является вполне объяснимым в рамках развиваемой эволюционной концепции. В зависимости от сценария эволюции, который определяется как нелинейными свойствами среды, скоростью генерации повреждений, так и балансом положительных (разгон автокаталитического процесса) и отрицательных (стабилизация деформационного процесса) обратных связей, среда может реагировать от типично вязкопластического поведения до хрупкого разрушения [4]. На рисунке 1 представлена схема расчетной области, приложенных нагрузок и граничных условий. На рисунке 2 представлены результаты расчета развития повреждений в кровле для разных скоростей генерации повреждений. Из-

менение только одного параметра t^* в законе генерации (5) полностью изменило эволюционный сценарий. На рисунке 2 *а* видно развитое вязкопластическое течение, а на рисунке 2 *б* – типичное фрактальное дерево ветвящихся трещин. В полосах локализованной неупругой деформации (повреждений) (рисунок 2 *а*) накопленные неупругие деформации более чем на порядок превышают деформации при хрупком растрескивании (рисунок 2 *б*). В нагруженной геосреде сформировались диссипативные структуры – блоки.



F – сила тяжести; MN – выработка; N – подвижная граница (забой); Δx – дискретный шаг наращивания выработанного пространства; AB – свободная (дневная) поверхность; AD, BC, DC – жесткие границы, обеспечивающие стесненные условия деформирования геосреды в поле сил тяжести; H – глубина выработки; h – высота выработанного пространства

Рисунок 1 - Схема расчетной области горного массива вокруг горной выработки

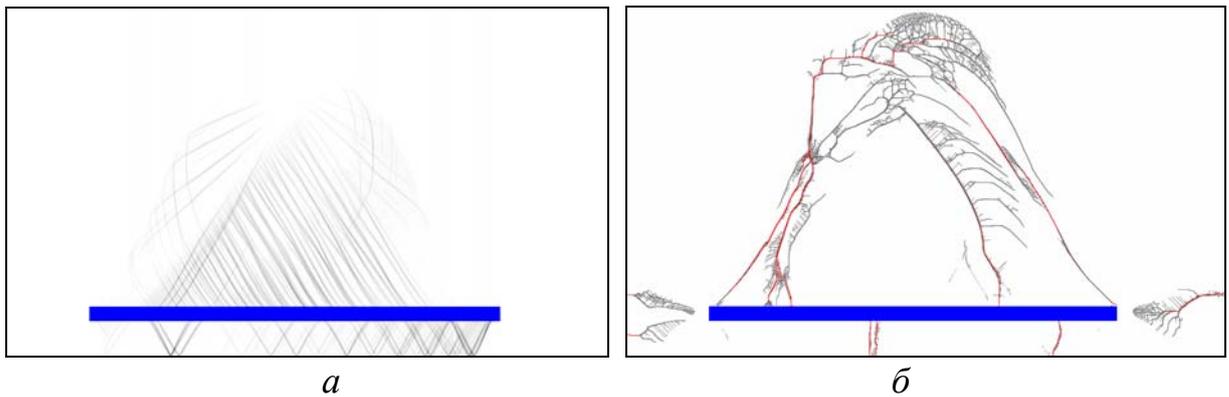


Рисунок 2 - Распределение повреждений вокруг горной выработки для вязкого (*а*) и хрупкого (*б*) разрушения в кровле

В зависимости от условий нагружения (скорости подвигания забоя) меняется и сценарий обрушения кровли. При малых скоростях подвигания забоя (рисунок 3) можно наблюдать равновесный режим [1], когда обрушения кровли происходят вслед за продвижением забоя. При высоких скоростях продвижения забоя наблюдаются протяженные участки зависшей кровли, реализуется существенно неравновесный режим, при котором поврежденность среды в кровле достигает критических значений только тогда, когда забой успевает уйти на значительные расстояния (рисунок

4). Подобные неравновесные режимы чрезвычайно опасны и грозят катастрофическими обрушениями больших участков кровли. Спусковыми механизмами подобных катастрофических обрушений могут быть различные причины (обводнение, наличие газов, быстрый рост исходных трещин и разломов в горном массиве). Все эти причины могут перевести медленную стадию эволюции повреждений в кровле в сверхбыстрые стадии в режимах с обострением [4], [8]. Эти вопросы требуют специального пристального изучения и в настоящей работе не рассматриваются. Мы рассматриваем тот случай, когда исключительно за счет нелинейных свойств среды без каких-либо провокаций извне медленная стадия эволюции повреждений в кровле сменяется сверхбыстрым режимом с обострением.

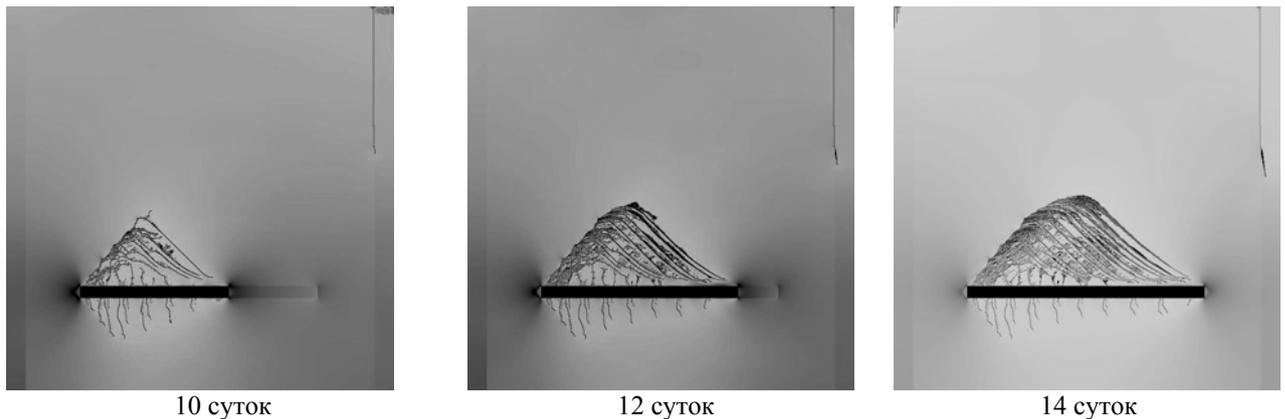


Рисунок 3 - Стационарный режим обрушения кровли. Кровля обрушается вслед за продвижением забоя. Длина расчетной области 80 м, выработки – 50 м.



Рисунок 4 - Неравновесный режим обрушения с образованием протяженных участков зависшей кровли. Длина расчетной области 80 м, выработки – 50 м.

На рисунке 5 показаны результаты моделирования первой посадки кровли и нескольких последующих. Расчеты выполнены для типичной ситуации, наблюдаемой в реальных условиях [1]. Шаг последующих обрушений приблизительно в два раза меньше, чем протяженность первой посадки. Каждая последующая посадка меньше предыдущей, так как увеличение пролета выработанного пространства ускоряет процесс накопления повреждений в кровле. На всех рисунках 2–5 видно также развитие повреждений в почве и ее выпучивание в выработанное пространство. В любой точке, где функция поврежденности достигает единицы и среда оказывается разрушенной

полностью, т.е. материал исчерпывает все возможности сопротивляться разрушению и его прочность становится нулевой, реализуется типичный эволюционный сценарий — предшествующая длительная квазистационарная стадия медленного накопления повреждений и медленной деградации прочности сменяется на режим сверхбыстрой эволюции (рисунок 6). Понятно, что для разных точек среды продолжительность этих стадий различна в зависимости от эволюции напряженно-деформированного состояния среды в этой конкретной точке. Подобное поведение материалов и сред хорошо известно из экспериментов [13].

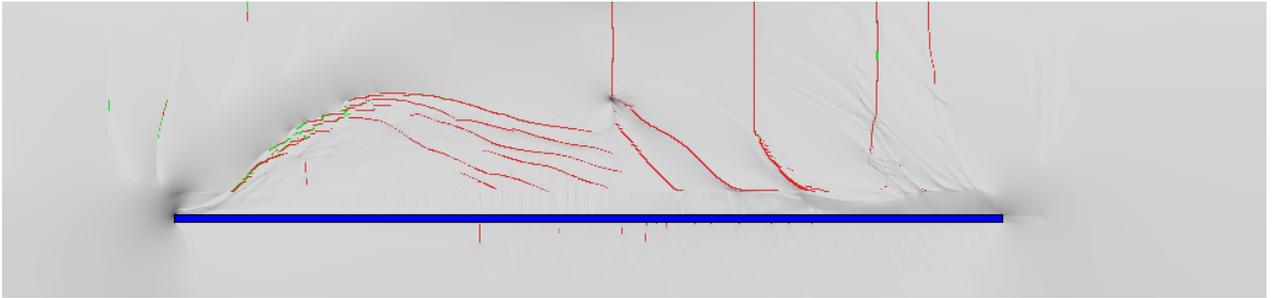


Рисунок 5 - Первая и последующие посадки кровли для случая, глубина выработки 200 м, длина выработки 300 м

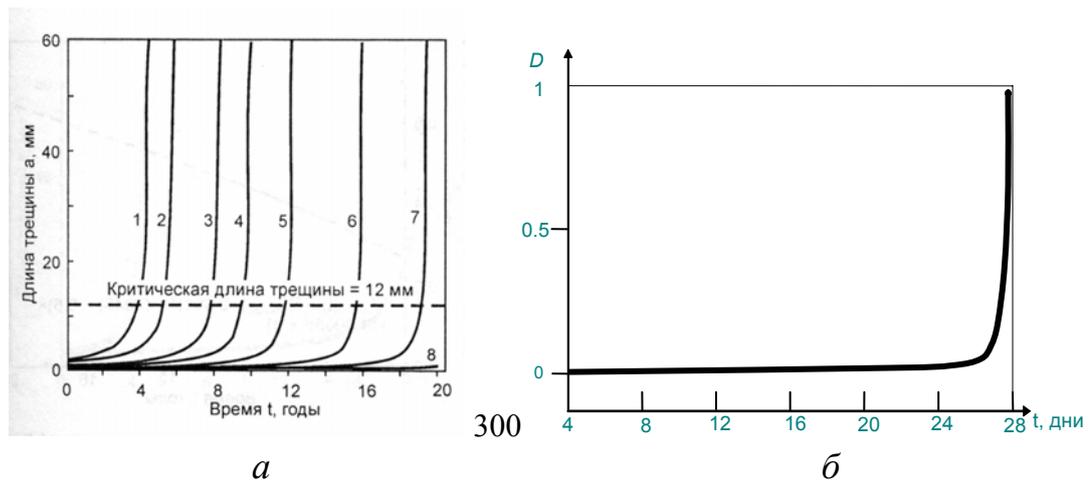


Рисунок 6 - Временная зависимость длины трещины для алюминия 7075-T6 (а): $\sigma_m=31,36$ МПа, $R=0,169$; $a_0 = 2,0(1); 1,5(2); 1,0(3); 0,8(4); 0,6(5); 0,4(6); 0,3(7); 0,2$ мм (8) [14] и зависимость поврежденности от времени в расчетах (б)

Так как эволюция геосреды происходит практически в стесненных условиях, обусловленных горным давлением и смягчаемых только наличием выработанного пространства, роль дилатационных процессов в развитии повреждений в горном массиве огромна. Роль дилатансии в эволюции напряженно-деформированного состояния в геосредах, а также в связи с развитием различных катастрофических событий, широко обсуждается в литературе [13], [15], [16].

Подробному рассмотрению этой сложной проблемы будет посвящена отдельная работа. Здесь остановимся только на нескольких вопросах принципиального характера. Еще М.М. Протодьяконовым [15] было замечено, что в геосреде, начиная с некоторой глубины, где гор-

ное давление создает напряженное состояние в среде, близкое к предельным величинам для этого материала, в геосреде за счет дилатансионных процессов формируются арки, принимающие на себя давление вышележащих пород, и с дальнейшим ростом глубины выработки горное давление перестает расти. Наши расчеты также демонстрируют формирование в поврежденной среде подобных арок (см. рисунки 2–5). Пока мы говорим только о качественной стороне проблемы, так как для выяснения количественных характеристик необходимы экспериментальные данные о величинах дилатансии для конкретных геосред в зависимости от приложенных нагрузок. Тестовые расчеты показали, что картина разрушения кардинально меняется в зависимости от принятой модели нарастания дилатансии. При большой дилатансии возможна ситуация, когда большинство периферийных трещин в кровле запирается, их рост замирает, и развиваются несколько или одна магистральная трещина в центральной части кровли (рисунок 7).

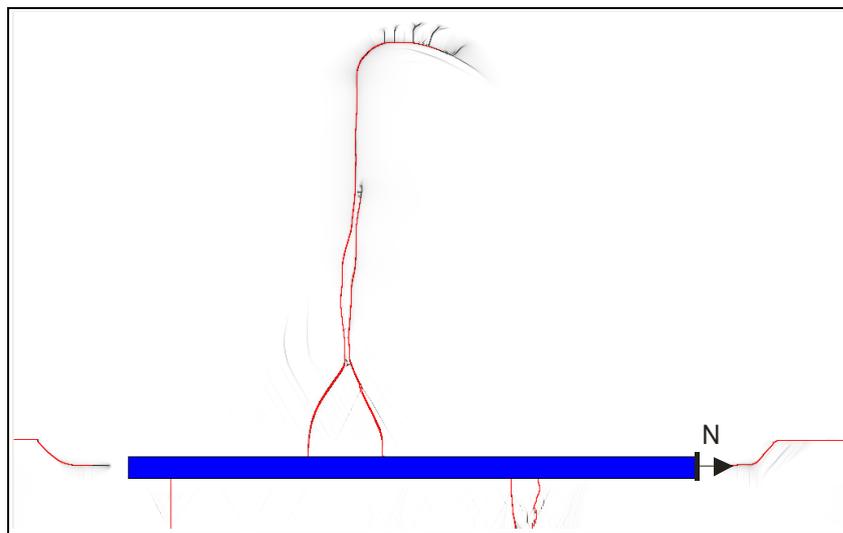


Рисунок 7 - Запирание периферийных трещин и развитие магистральных трещин в центральной части кровли при большой величине дилатансии

Часто в некоторых работах по геомеханике говорят о дилатансионном упрочнении среды. На наш взгляд подобная концепция неверна, не может частично разрушенный материал быть прочнее неразрушенного. Такая концепция появилась в рамках фактически одномасштабного макроскопического описания разрушения однородного континуума, когда при некотором уровне напряжений σ_1 материал оказывается частично поврежденным. За счет развития дилатансии стесненность деформации нарастает, что вызывает рост напряжений. Формально получается, что последующее разрушение происходит при более высоком уровне напряжений, что породило неверную концепцию дилатансионного упрочнения.

Понимание того факта, что разрушение есть многомасштабный иерархический процесс, а нагружаемая среда неоднородна во всей иерархии масштабов, хотя бы потому, что в ней всегда присутствует исходная поврежденность, все ставит на свои места. По мере накопления повреждений в каждой точке геосреды средняя ее прочность только падает от некоторого исходного значения до нуля, и в этом случае значение функции поврежденности $D(\sigma) = 1$ (рисунок 8). При среднем макроскопическом напряжении в точке A , равном σ_A , локальные напряжения на более низких масштабах могут существенно превышать и средние напряжения, и величину прочности материа-

ла, что и приводит к появлению повреждений разных масштабов, падению средней макроскопической прочности и росту среднего напряжения в этой точке за счет дилатансии. Кривые σ_A и σ_M сближаются. Когда $\sigma_A = \sigma_M$, то только в этой локальной точке A , а не во всем образце, будет иметь место локальное макроскопическое разрушение. В этом случае величина поврежденности $D(\sigma) = 1$ в локальном макроскопическом объеме A . В рассматриваемой эволюционной модели все нижележащие уровни учтены усредненно через функцию поврежденности $D(\sigma)$. В уравнении (5) для $D(\sigma)$ при малой величине σ_0 , меньшей макроскопического предела текучести Y , модель позволяет накапливать повреждения и дилатансию уже на макроскопически упругой стадии, но не упругой на малых масштабах. Такой подход, на взгляд авторов, позволяет качественно правильно учитывать дилатансию и описывать поведение хрупкой геосреды в стесненных условиях деформирования.

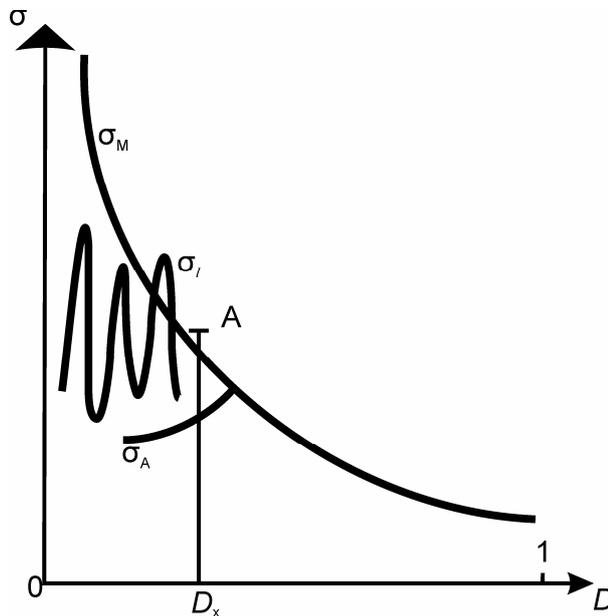


Рисунок 8 - Зависимость усредненной макроскопической прочности геосреды от накопленных повреждений; σ_M – макроскопическая прочность геосреды; σ_A – среднее напряжение в некоторой точке A частично поврежденной геосреды; σ_e – локальные напряжения на промежуточных масштабах

4 Заключительные замечания

В работе задача о механическом поведении геосреды вокруг выработки решается с точки зрения развиваемого авторами эволюционного подхода. Расчеты эволюции повреждений в кровле над выработанным пространством показали, что в кровле формируется иерархия блоков разных масштабов, разделенных полосами локализованных повреждений. Показано также, что в зависимости от конкуренции отрицательных обратных связей, стабилизирующих деформационный процесс и сглаживающих неоднородности в распределениях параметров, и положительных обратных связей, разгоняющих автокаталитический процесс деградации нагружаемой среды, сценарий эволюции геосреды может меняться от типичного вязкопластического течения до сугубо хрупкой реакции. Отмечена важная роль дилатансии в развитии деформации в стесненных условиях. Пока-

зано, что дилатансионные процессы приводят к образованию в поврежденной среде арочных форм. Дана критика концепции дилатансионного упрочнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Макаров, П.В. Моделирование обрушения кровли над выработанным пространством / П.В. Макаров, И.Ю. Смолин, Е.П. Евтушенко, А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, С.П. Ворошилов // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11. – № 1. – С. 44–50.
- 2 Якоби, О. Практика управления горным давлением / О.Якоби. – М.: Недра, 1987. – 566 с.
- 3 Никишин, Д.Ю. Обоснование эффективных способов предотвращения обрушений пород кровли в лавах надрабатываемых слоев: дис. ... канд. техн. наук. – С.-Петербург, 2007 – 153 с.
- 4 Макаров, П.В. Математическая теория эволюции нагружаемых твердых тел и сред/ П.В. Макаров // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11. – № 3. – С. 19–35.
- 5 Макаров, П.В. Нелинейная механика геоматериалов и геосред / П.В. Макаров, И.Ю. Смолин, Ю.П. Стефанов, П.В. Кузнецов, А.А. Трубицын, Н.В. Трубицына, С.П. Ворошилов, Я.С. Ворошилов. – Новосибирск: Гео, 2007. – 235 с.
- 6 Макаров, П.В. Эволюционная природа блочной организации геоматериалов и геосред. Универсальный критерий фрактальной делимости / П.В. Макаров // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48. – № 7. – С. 724–746.
- 7 Николис, Г. Познание сложного / Г. Николис, И. Пригожин. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 344 с.
- 8 Курдюмов, С.П. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем / С.П. Курдюмов, Е.Н. Князева. – М.: Наука, 1994. – 236 с.
- 9 Гарагаш, И.А. Неассоциированные законы течения и локализации пластической деформации / И.А. Гарагаш, В.Н. Николаевский // Успехи механики. – 1989. – Т. 12. – № 1. – С. 131–183.
- 10 Малинецкий, Г.Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 356 с.
- 11 Карпинтери, А. Прогноз развития трещин в полномасштабных конструкциях на основе анализа показателя b и статистики Юла / А. Карпинтери, Дж. Лачидонья, С.Пуцци // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11. – № 3. – С. 75–87.
- 12 Наймарк, О.Б. Структурно-скейлинговые переходы и автомодельные закономерности развития землетрясений / О.Б. Наймарк // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11. – № 2. – С. 89–106.
- 13 Гольдин, С.В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения/ С.В. Гольдин // Физика Земли. – 2004. – № 10. – С. 37–54.
- 14 Си Дж. Мезомеханика, понятие сегментации и мультискейлинговый подход: нано-микро-макро / Си Дж. // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11. – № 3. – С. 5–18.
- 15 Протодьяконов, М.М. Давление горных пород и рудничное крепление. Ч.1. Давление горных пород / М.М. Протодьяконов. – М.: Госгориздат, 1933. – 127 с.
- 16 Шемякин, Е.И. Механика горного массива/ Е.И. Шемякин // Научные сообщения Института горного дела им. А.А. Скочинского. – 2007. – Вып. 333. – С. 137–152.