

О ПРОБЛЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Обґрунтована методологія забезпечення стійкості гірничих виробок у змінних і невизначених умовах їх спорудження, яка полягає у керуванні станом виробки як геотехнічної системи "масив-породне оголення-кріплення" згідно з адаптаційною концепцією.

Опыт сооружения и поддержания выработок на угольных шахтах свидетельствует о том, что, несмотря на достаточно большое внимание ученых и специалистов к проблеме обеспечения устойчивости выработок, использование прогрессивных расчетных методов и огромные затраты материальных и трудовых ресурсов на шахтах, надежность выработок остается весьма низкой.

Анализ проблемы обеспечения устойчивости выработок, установление причин ее возникновения и связи с другими проблемами угольной промышленности, выявление комплекса условий, в которых возникла проблема, показали, что основной причиной малой эффективности традиционной технологии крепления выработок на угольных шахтах является несоответствие применяемой методологии и способов обеспечения устойчивости выработок изменчивым и во многом неопределенным условиям их сооружения и поддержания.

В настоящее время общепризнано, что выработки функционируют в условиях стохастической и природной неопределенности основных действующих факторов, что явилось причиной зарождения статистической геомеханики [1]. Однако до сих пор надежных вероятностных методик прогнозирования геомеханических процессов и универсальных крепей, инвариантных и горно-геологическим условиям, не разработано. Устойчивость выработок рассматривают, обособлено на различных этапах жизненного цикла (проектирования, сооружения, эксплуатации, повторного использования). Проектируют выработки на основе мало достоверной информации, ориентируясь на эмпирические зависимости [2], полученные путем обобщения инструментальных наблюдений, проведенных еще угольных бассейнах СССР, и аналитические решения идеализированных задач о плоском деформировании пород вокруг выработки в стационарных условиях [3].

На практике сооружают и поддерживают выработки при полном отсутствии геомеханической информации, а крепят их конструкциями, которые являются аналогами систем с жесткой и дискретной структурами. Первый тип систем состоит из элементов, объединенных жесткой связью, т.е. в нашем случае различными проявлениями горного давления, характеризующихся конфигурацией зоны разрушения, смещениями пород и нагрузкой на крепь, соответствуют определенные типы крепи со своими параметрами (несущей способностью и податливостью). При наличии такой связи крепь определенного типа хорошо приспособлена к конкретным условиям, посредством чего достигается высокая организованность. Однако такие системы очень уязвимы при невозможности применения, в силу различных причин, крепи определенного типа, а также в изменчивых и неопределенных условиях, так как жесткие структуры не способны приспосабливаться к изменению условий.

Противоположный тип систем имеет дискретную структуру, они формируются из множества однородных и подобных элементов, обладающих свойством взаимозаменяемости. Их наглядным примером служит арочная податливая металлическая крепь из спецпрофиля. В результате своей одинаковости такие конструкции крепи слабо дополняют друг друга в различных условиях, и поэтому они не обладают организованностью. Однако в случае вариации условий их можно приспособить к внешней среде за счет изменения плотности установки рам, применения более тяжелых профилей, повышения сопротивления узла податливости, увеличения конструктивной податливости для компенсации запаса сечения на осадку за весь срок службы выработки. Именно способность к адаптации позволяет крепям из спецпрофиля относительно успешно перекрывать весь диапазон проявлений горного давления на угольных шахтах, что явилось основной причиной столь широкого их распространения. Однако такой подход к обеспечению устойчивости выработок, при котором в очень малой степени используется собственная несущая способность пород, привел за последние годы, совместно с газовым фактором, к увеличению площади сечения выработок в 2 раза и обусловил повсеместное применение тяжелых профилей (СВП-27 и СВП-33). Это сопровождалось нерациональным расходом материалов, ростом трудоемкости горнопроходческих работ, снижением скорости проведения выработок и увеличением себестоимости добычи угля.

Следует отметить, что существует и третий тип структур, характеризующихся сочетанием достоинств двух первых. Это системы, у которых имеется управление, называемые гибкими. Благодаря взаимодополняемости элементов они обладают высокой организованностью, а за счет способности различного сочетания элементов – высокой пластич-

ностью. Принципам поведения гибких систем соответствует новый австрийский способ сооружения туннелей NATM [4] и крепи с регулируемой несущей способностью [5]. Однако эти способы в большей степени направлены на управление сопротивлением крепи, а не использования несущей способности породного массива. Кроме того, управление с их помощью осуществляется на базе неформализованных данных, принципы которого не разработаны.

Таким образом, при строительстве и поддержании горных выработок в условиях неопределенности необходимо учитывать современные принципы проектирования и управления производством, а также применять методы принятия решений в различного рода ситуациях, основанные на системном подходе [6, 7], идеи которого нашли широкое применение в передовых отраслях. При этом руководящими идеями должны служить адаптация и ресурсосбережение.

Для уяснений сути предлагаемого подхода воспользуемся основными понятиями системологии [6], так как по своим признакам выработка относится к техническим системам. Создают ее, как любую другую систему, для достижения определенной цели, в связи с этим она должна обладать определенной структурой и свойствами, обусловленными ее назначением. Выработка не сооружается и не используется сама по себе. Ее следует рассматривать как составляющую часть другой, более полной, технологической системы (шахты), в пределах которой обеспечивается всесторонний учет всех аспектов функционирования. С этой точки зрения процессы проведения и поддержания выработки можно представить как обмен веществом, энергией и информацией, вследствие чего за получение полезного эффекта (выработки с заданной устойчивостью) полная система (шахта) расплачивается некоторым количеством ресурсов, т.е. терпит определенные издержки, выражаемые стоимостью этих ресурсов и затраченным рабочим временем. Очевидно, что чем лучше результат обмена, тем выше потенциал структуры, а противоречия между взаимодействующими элементами наоборот проявляются в нерациональном расходовании ресурсов и повышении себестоимости продукции. В каждом конкретном состоянии выработка как система обладает определенными свойствами, которым соответствует совокупность значений параметров, посредством которых формализуется ее поведение. С ростом согласования параметров (например, нагрузки и несущей способности крепи, смещений пород и конструктивной податливости) эффективность использования выработки повышается. Нарастание же противоречия между желаемым и действительным состоянием выработки при неизвестных путях преодоления этого расхож-

дения, проявляющееся в бессмысленном расходовании ресурсов, наоборот, ведет к снижению эффективности.

По своей сущности выработка – это инженерное сооружение, образованное в результате ведения горнопроходческих работ и представляющее собой полость в породном массиве, снабженную при необходимости крепью для обеспечения ее устойчивости в течение заданного срока службы. Крепь через породное обнажение произвольного очертания находится в механическом взаимодействии с окружающими ее породами и поэтому должна рассматриваться не как обособленная конструкция, а как составная часть единой системы "крепь - породное обнажение - массив". При этом каждая из подсистем характеризуется собственной набором элементов, объединение которых в систему происходит в ходе зарождения и развития геомеханических процессов, инициируемых проведением выработки и продолжающихся весь срок ее поддержания. Поэтому к "массиву" относятся только приконтурные его элементы, в которых изменилось исходное напряженное состояние в результате образования полости и зоны разрушенных пород, перемещающейся в глубь массива.

Следовательно, выработку с системных позиций необходимо рассматривать как расширяющуюся геотехническую систему, состоящую из части породного массива, породного обнажения и крепи, которые объединены в единое целое отношениями и связями в течение всего жизненного цикла, в результате чего система имеет определенную управляемую структуру и приобретает специфические интегративные свойства, неприсущие ни одной из слагающих ее частей. Такими свойствами для технических систем являются: надежность (устойчивость); помехоустойчивость (информативность); управляемость; способность и самоорганизация (адаптивность) [6]. Свойства перечислены в порядке усложнения, т.е. система, обладающая данным качеством, имеет и все другие более простые, но не имеет качеств более высокого порядка. Проанализируем отмеченные качества применительно к выработке.

Первичным качеством любой технической системы является устойчивость, определяющая степень ее пригодности для использования. Системы, не обладающие этим качеством, не могут просто существовать. Для сложных систем, к которым относится и горная выработка, обладающая в результате наличия функциональной избыточности способностью при отказе отдельных элементов (разрушении пород) продолжать выполнение производственной задачи с некоторым снижением показателей эффективности, присущи два вида устойчивости: вещественно-энергетическая и структурно-функциональная. Если порознь массив горных пород, незакрепленное породное обнажение и крепь, как

конструкции, характеризуются устойчивостью первого вида, связанной с понятиями прочности, то с объединением их в систему возникает качественно иной вид устойчивости, характеризующийся неизменностью структуры как упорядоченности взаимосвязи ее элементов при переменном вещественном составе. Это качество по отношению к техническим системам называют надежностью. В горной же практике для характеристики состояния выработок применяют термин устойчивость, причем в различных источниках вкладывают в него различный смысл [8-11], а понятие надежность, оцениваемое целым рядом вероятностных показателей [12], практически не используется.

Для решения отмеченной проблемы в ДонГТУ на основе представления выработки как расширяющейся геотехнической системы исследована ее работоспособность во времени [13]. Теоретически обоснована методика принятия решений по обеспечению надежности выработки в условиях неопределенности, которая базируется на концепции адаптации ее подсистем (массив, породное обнажение, крепь). Методика позволяет за счет определения условной вероятности достижения цели (требуемой надежности) оценивать состояние выработки в течение всего жизненного цикла, и выбирать управляющие стратегии и активные способы. Для оценки работоспособности способов предложен показатель адаптации, который трактуется как вероятностная гарантия достижения цели. Разработаны модели взаимодействия различных способов с внешней средой, позволяющие оценивать соответствие самых разнообразных пересекающихся параметров.

Другим качеством технических систем, более сложным, чем устойчивость или надежность, является помехоустойчивость или информированность, представляющая собой способность системы без искажений воспринимать и передавать информацию. В настоящее время выработки, как геотехнические системы отвечают лишь первичным требованиям надежности и не обладают качеством информированности, поскольку технология их сооружения и поддержания не предусматривает получение и использование информации о геомеханических процессах. Однако обеспечение более высокой эффективности выработок в условиях неопределенности предполагает переход на качественно новый уровень, что невозможно без наличия достоверной информации. Применительно к геотехнической системе технологический контроль должен предусматривать получение информации о постоянно изменяющемся состоянии вмещающих ее пород и крепи, хранение информации в памяти ЭВМ для последующей ее идентификации и выявления соответствия между параметрами выбранного способа обеспечения устойчивости выработки и проявлениями горного давления [14].

Для того чтобы выработка обладала качеством информированности, в ДонГТУ разработана методика технологического контроля на различных этапах существования выработки и сформулированы теоретические основы компьютерного моделирования на базе решения псевдо-пространственной задачи [13]. Для прогнозирования проявлений горного давления разработана методика моделирования геомеханических процессов и явлений в сложно-структурном массиве, ослабленном выработкой случайной конфигурации, и программное обеспечение для его реализации на ПЭВМ. Сочетание мониторинга за развитием разрушения пород и имитационного моделирования, периодически корректируемого по результатам шахтных наблюдений, позволяет устранить неопределенность геомеханической информации, и, прежде всего, установить неизвестное поле напряжений, а также использовать математическое моделирование в период времени между замерами для прогнозирования смещений пород. При этом в качестве показателя, характеризующего состояние пород, принят коэффициент трещинной пустотности, представляемый в виде функции пространственных координат, изменяемой во времени. Использование коэффициента позволяет сопоставить результаты наблюдений и имитационного моделирования, определить стадию развития деформационного процесса и оценить свойства пород за пределом прочности.

Следующим системным качеством является управляемость. Управление – это функция системы, ориентированная на сохранение ее основного свойства (устойчивости), либо направленная на выполнение некоторого алгоритма достижения поставленной цели. Под управляемостью выработки как геотехнической системы следует понимать способность переходить за заданное время из одного состояния в другое под влиянием управляющих воздействий. Управляемость обеспечивается за счет прямой и обратной связей, служащих для передачи информации о геомеханических процессах и адекватных им способах обеспечения устойчивости породного обнажения. В настоящее время сформулированы лишь общие принципы управления состоянием массива вблизи горных выработок [15]. Для выработки управляемость должна выражаться в способности принятия решений в самых разнообразных ситуациях о соответствии фактического уровня надежности требуемому, на основе чего должны формироваться управляющие воздействия.

С этой целью в ДонГТУ [13] формализованы принципы управления надежностью выработки как геотехнической системы, и разработаны параметры управления состоянием выработки за счет разгрузки, уплотнения, анкерования, инъектирования скрепляющих составов и предварительного распора крепи. При этом совместное механическое пове-

дение монолитного, трещиноватого и затампонированного массивов с крепью описано диаграммами запредельного деформирования и регрессионными зависимостями между управляющими технологическими параметрами и деформационно-прочностными показателями пород. Предложены модели для определения несущей способности массива за пределом прочности и оценивания вероятности работоспособного состояния выработки с учетом управляющих воздействий.

Способность есть следующее системное качество в порядке усложнения, которое определяет возможность выработки как геотехнической системы решать те или иные функциональные задачи: обеспечивать производство продукции в соответствующие сроки, определенный поток транспортных перевозок, пропуск требуемого расхода рудничного воздуха и т.д. Способность отражает потенциальную эффективность выработки при идеальном способе использования, она является необходимым, но не достаточным условием функционирования геотехнической системы. Действительно, бессмысленно сооружать выработку неспособную достичь поставленную цель. С другой стороны потенциальная эффективность шахты как метасистемы не будет достигнута, если входящая в ее подземный комплекс выработка не будет обладать требуемой надежностью. Однако будет ли способна выработка гарантировать требуемую надежность, если до сих пор форма и размеры поперечного сечения выработки назначаются исходя из условия размещения в ней оборудования, а не минимизации проявлений горного давления.

Для того чтобы обеспечить требуемую надежность выработки, в ДонГТУ [13] разработаны новые активные способы изменения напряженно-деформированного состояния массива и адаптации крепи к внешней среде (выбор объемно-планировочного решения выработки с учетом напряженного состояния массива; разгрузка пород от напряжений щелями и камуфлетными взрывами; упрочнения пород за счет анкерования, уплотнения и инъектирования скрепляющих составов; обеспечение регулируемого режима работы рамной и сборной сплошной крепи). Некоторые из способов опробованы в производственных условиях, в результате чего обоснованы их рациональные параметры, разработаны технология и организация работ, доказана результативность применения и оценена экономическая эффективность от их внедрения.

Наконец, наиболее сложным качеством обладают технические системы, способные изменять свою структуру, параметры и поведение с целью повышения эффективности выполнения своих функций за счет адаптации к внешней среде, характеризующейся неопределенностью. В горной практике подобные ситуации возникают на всех этапах существования выработки: при проектировании, когда проектировщик при вы-

боре крепи в лучшем случае располагает лишь информацией о диапазонах возможных значений прочности пород и не имеет сведений о предполагаемых нагрузках на крепь; при строительстве, когда ситуация непрерывно меняется в силу изменчивости свойств неоднородного породного массива и перемещения забоя; при поддержании, когда условия эксплуатации выработки кардинально изменяются под влиянием очистных работ (например, надработка). Неопределенность такого рода может быть устранена лишь при наличии всех предшествующих качеств, которыми выработка как система до сих пор не располагает в виду отмеченных выше причин.

Чтобы выработка была способна к адаптации при вариации внешних условий конструирование структуры геотехнической системы должно производиться в соответствии с критерием

$$\mu^*(t, \tau) : \sup W_t(\mu, t, \tau), \quad (1)$$

где $\mu^*(t, \tau)$ – рациональная стратегия из множества способов $M(t, \tau)$, которая с упреждением прогноза τ обеспечивает выполнение условия $W_t(\mu^*) \geq W_{t,тр}(\mu(t))$;

W_t – изменяющийся во времени t показатель эффективности, представляющий собой вероятностную меру соответствия реального результата требуемому и определяемый как математическое ожидание от функции соответствия взаимодействующих параметров способа и среды;

$W_{t,тр}$ – требуемое значение показателя эффективности, назначаемое директивно, исходя из требуемых качеств выработки, или определяемое путем минимизации стоимости выполнения поставленных задач;

$\sup W_t(\mu, t, \tau)$ – наибольшее значение показателя эффективности W_t для выбранных способов обеспечения устойчивости выработки $M(t, \tau)$, которые являются рациональными к моменту времени t .

Запись (1) означает, что цели системной операции, а следовательно показатели и критерии, могут меняться во времени в зависимости от складывающейся ситуации. Использование такого критерия дает возможность выбрать не худшую стратегию $\mu^*(t, \tau)$ с точностью до ошибок прогнозирования на период прогноза τ . При этом получение управляющих воздействий основывается на ряде принципов:

- непрерывном получении информации о развитии геотехнических процессов вокруг выработки путем геомеханического контроля и компьютерного моделирования;

- выборе управляющей стратегии в рамках обобщенной системной операции по условной вероятности достижения цели на различных этапах жизненного цикла выработки с учетом экономического риска, а на уровне частных операций с помощью безразмерного показателя

адаптации, устанавливающего качество взаимодействия способа обеспечения устойчивости выработки со средой;

- оперативном реагировании на изменение горно-геологической ситуации как регулированием отдельных параметров, так и изменением структуры геотехнической системы в целом;

- сведении к минимуму числа неуправляемых входных параметров и переводе геомеханических факторов и факторов, определяющих проектное решение, в разряд управляемых на различных стадиях развития геомеханических процессов;

- искусственном создании горно-геологической ситуации, адекватной существующим крепям, путем целенаправленного воздействия на свойства массива и ограничения случайности системного входа;

- непрерывном воздействии на элементы геотехнической системы в течение всего жизненного цикла для пополнения их числа и обеспечения работоспособности;

- использование активных способов, обладающих высоким уровнем механизации и организационно-технологической взаимосвязи с технологическими процессами при проведении, поддержании и ремонте выработок;

- ресурсосбережении путем более полного использования собственной несущей способности горных пород за пределом прочности.

Принятие решений согласно критерию адаптации (1) оказывается самым сложным по способу получения управляющих воздействий, но в то же время такой подход является единственно приемлемым при проведении и эксплуатации выработок в неопределенных условиях, так как наделяет геотехническую систему целеустремленным и гибким поведением. В ее рамках решения по обеспечению устойчивости выработки не следует принимать во всех деталях на всю обозримую перспективу на основе априорной информации. В любой момент времени должна сохраняться свобода выбора решений, которая заключается в принятии не одного лучшего решения, а нескольких приемлемых, и обеспечении возможности пересмотра, уточнения принятого решения по мере поступления текущей информации. В зависимости от складывающейся ситуации всегда остается возможность вернуться к предыдущему этапу и изменить ранее принятое решение так, чтобы осталась свобода выбора на последующих шагах. Этим обеспечивается гибкость управления и существенно повышается надежность функционирования выработки.

Обоснована методология обеспечения устойчивости горных выработок в изменчивых и неопределенных условиях их сооружения, которая заключается в управлении состоянием выработки как геотехни-

ческой системы "массив - породное обнажение - крепь" согласно адаптационной концепции.

The methodology, which provides the mine working stability in the variable and indefinite conditions of building and maintenance, is grounded. This methodology based on a management the state of mine working as a geotechnical system "rock massif – rocky baring – lining" in accordance of adaptive conception of systems functioning.

Библиографический список.

1. Шашенко А.М. Некоторые задачи статистической геомеханики / А.Н. Шашенко, С.Б. Тулуб, Е.А. Сдвижкова. – К.: Універ. вид-во "Пульсари", 2002. – 304с.

2. Инструкция по выбору рамных податливых крепей горных выработок. – Ленинград: ВНИМИ, 1991. – 125с.

3. Баклашов И.В. Механика горных пород / И.В. Баклашов, Б.А. Кортозия. – М.: Недра, 1975. – 271с.

4. Альбертс Г.Ю., Цастрау К. Проходка горизонтальной породной выработки с использованием нового австрийского способа туннелестроения // Глюкауф. – 1981. – №7. – С.20-26.

5. Быков А.В. Ускорить внедрение крепей регулируемого сопротивления на шахтах Донбасса // Шахтное строительство. – 1986. – №3. – С.3-8.

6. Флейшман Б.С. Основы системологии / Б.С. Флейшман. – М.: Радио и связь, 1982. – 368с.

7. Корчак А.В. Методология проектирования строительства подземных сооружений / А.В. Корчак. – М.: Недра коммюникейшнс ЛТД, 2001. – 416с.

8. Максимов А.П. Выдавливание горных пород и устойчивость подземных выработок / А.П. Максимов. – М.: Госгортехнадзор, 1963. – 144с.

9. Булычев Н.С. О критериях устойчивости окружающих выработку пород. // Устойчивость и крепление горных выработок. – Л.: ЛГИ, вып.13, 1976. – С.3-7.

10. Кошелев К.В. Повышение устойчивости капитальных выработок на больших глубинах / К.В. Кошелев, В.Ф. Трумбачев. – М.: Недра, 1972. – 128с.

11. Усаченко Б.М. Свойства пород и устойчивость горных выработок / Б.М. Усаченко. – К.: Наук. думка, 1979. – 136с.

12. Червонный А.А. Надежность сложных систем / А.А. Червонный, В.И. Лукьященко, Л.В. Котин. – М.: Машиностроение, 1976. – 288с.

13. Бабиюк Г.В. Системное обоснование и разработка адаптивных способов обеспечения надежности горных выработок: дис. докт. техн. наук: 05.15.04: защищена 4.03.05: утв. 08.06.05 / Бабиюк Генна-

дий Васильевич; Национальный горный университет, – Днепропетровск, 2005. – 522с.

14. Ямщиков В.С., Вознесенский А.С. Информационные основы технологического контроля геомеханических процессов // ФТПРПИ. – 1994. – №3. – С.3-11.

15. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок / В.В. Виноградов; Отв. ред. Зорин А.Н.; АН УССР. Ин-т геотехн. механики. – К.: Наук. думка, 1989. – 192с.

*Рекомендовано к печати
д. т. н., проф. Клишиным Н.К.*