

УДК 622.281

С.В. Мартыненко, А.В. Скобенко

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ СТАЛЬНОЙ РАМНОЙ КРЕПИ

Розглянуто питання проектування гірничого кріплення з урахуванням геомеханічної системи “кріплення-породний масив” як стохастичної системи з високим рівнем невизначеності.

THE THEORY AND PROCEDURE OF CALCULATIONS OF PARAMETERS OF A STEEL FRAME SUPPORT

The problem of designing of a mining support surveyed in view of a mechanical system “support-rock mass” as stochastic system with a high level of indeterminacy.

Введение

Наиболее распространенная в настоящее время металлическая крепь из СВП как подпорная конструкция в традиционном виде практически полностью исчерпала свои возможности в выработках, проводимых в сложных горно-геологических условиях. Увеличение глубины разработки угольных пластов и связанный с этим рост горного давления привели к тому, что на шахтах Украины более 50% выработок находятся в неудовлетворительном состоянии, а протяженность ремонтируемых выработок колеблется от 20 до 40% от поддерживаемых. Однако, благодаря широкой освоенности производства, технологичности работ по ремонту, возможности многократного использования, указанная крепь еще длительное время будет оставаться основной при обеспечении устойчивости горных выработок.

Состояние вопроса

До сих пор при проектировании крепи подготовительных выработок по классическим методикам, в силу высокой идеализации вмещающего породного массива, прослеживается явная тенденция несоответствия в большинстве случаев параметров крепи реальным горно-геологическим условиям их эксплуатации. Это, в свою очередь, приводит либо к существенному превышению несущей способности и, следовательно, стоимости крепи, либо к дополнительным эксплуатационным затратам на ремонт.

Таким образом, повышение несущей способности металлической крепи является актуальной задачей, а основными путями ее решения являются поиск и определение рациональной конфигурации сечения профиля с моментами сопротивления, более полно учитывающими направление силовых воздействий на раму [1], создание несущих многоэлементных конструкций, обладающих гибкостью изменения пространственного расположения элементов крепи применительно к условиям нагружения [2], применение высокопрочных сталей для

изготовления элементов крепи, разработка узлов соединения элементов [3], и, наконец, определение и обоснование параметров, изменение кинематической характеристики крепи путем рассмотрения геомеханической системы “крепь-породный массив” как стохастической системы с довольно высоким уровнем неопределенности.

Согласно современным представлениям, рамные крепи, используемые в тяжелых геомеханических условиях должны иметь рабочее сопротивление до 400 кН на раму и конструктивную податливость на уровне 1000 мм и более. Количество образующих сегментов должно быть не менее 4-х, в узлах податливости должны использоваться замковые соединения, обеспечивающие стабильное зажимное усилие и т.д. Данным требованиям не отвечает ни одна из отечественных конструкций, производимых серийно. Виной тому – отсутствие апробированных методик при проектировании крепей в зоне влияния очистных работ и, соответственно, возникающего при этом несимметричного нагружения. Проектирование крепи, основанное на т.н. «методе аналогий», ведет, как уже отмечалось выше, либо к перерасходу материала, либо к потере несущей способности крепи, что впоследствии вызывает затраты на ремонт и укрепление.

Материал исследований

А. Определение величины горного давления

Дальнейшего изучения и развития требуют методы прогнозирования изменения напряженно-деформированного состояния породного массива при проведении и эксплуатации выработок, повышения эффективности технических мер по снижению опасного его деформирования, направленное регулирование взаимодействия элементов системы «крепь-породный массив» в условиях многофакторного силового воздействия.

Выше была показана необходимость применения при проектировании крепи и планировании ремонтно-восстановительных работ расчетных методик, позволяющих бы учитывать многообразие случайных горно-геологических и горно-технических факторов, влияющих на устойчивость. Несмотря на очевидную актуальность этой проблемы, достаточно универсального метода расчета пока еще нет – ведь в конечном итоге при проектировании горной крепи решаются несколько вопросов: выбор и расчет конструкции, обеспечение эксплуатационного состояния в течение необходимого срока при соблюдении технических, экономических и функциональных требований. При этом, как правило, сам расчет сводится к определению номера прокатного профиля, из которого будет изготовлена конструкция, или же к оптимизации шага установки крепи, если номер профиля известен заранее.

Основной причиной ошибок при проектировании, вызывающих значительные расходы на поддержание и ремонт крепи, является отсутствие достоверных данных о величине и направлении внешних воздействий. Сюда же следует отнести и использование нормативных документов, в которых силовые характеристики крепи установлены расчетным методом и не подтверждены фактическими данными [2]. Таким образом, основным вопросом при составлении расчетной схемы крепи является определение величины горного давления, т.к. рас-

считывать его при существующих глубинах разработки и значительном усложнении геомеханических условий по известным формулам корифеев горной науки (М.М.Протодьяконова, П.М. Цимбаревича и др.), естественно, нельзя. Прямое же определение величины давления на крепь в натуральных условиях – довольно сложный и трудоемкий процесс. При этом для получения достоверных показаний жесткость, например, динамометров должна соответствовать жесткости крепи, что не всегда возможно осуществить практически. Кроме этого, полученные таким образом данные можно использовать лишь в случае достаточного для этого их количества (не менее 50). Оборудование же такого числа замерных станций требует значительных материально-трудовых затрат, что не всегда является оправданным.

Известно, что многие исследователи пользуются для указанных выше целей сведениями из различных литературных источников. Анализ и обработка таких сведений является более надежным вариантом, т.к. используются данные, полученные для различных условий, которые практически невозможно получить в одиночку.

Полученная картина характера формирования и величины нагрузки на крепь, данные о соотношении вертикальных и боковых составляющих и влиянии различных факторов на исследуемые величины позволяет при выполнении дальнейших аналитических исследований разработать расчетную схему, которая, в принципе, может считаться обоснованной лишь в случае возможности рассмотрения в ней способов повышения устойчивости выработки путем изменения параметров крепи и ее кинематической характеристики.

В настоящее время горные выработки на всем своем протяжении крепятся в основном одним типом крепи, независимо от частого изменения горно-геологических условий. Естественно, что прочностные и деформационные характеристики пересекаемых выработкой пород могут существенно изменяться даже в пределах одной литологической разности, что вызывает неравномерность нагрузок на крепь по длине выработки. Причем эта неравномерность может достигать значительных величин (на порядок и более).

Нормативные документы по выбору типа конструкции крепи, в принципе, предусматривают дифференцированный подход к креплению отдельных участков выработки, имеющих более 30% отклонения прочностных свойств вмещающих пород, однако это условие не реализуется ввиду отсутствия практических рекомендаций.

В последние годы началось интенсивное изучение систем со случайными недетерминированными параметрами, т.е. такими, величина которых может быть предсказана лишь с определенной степенью вероятности. Расчеты с учетом вероятности появления тех или иных состояний применительно к устойчивости горных выработок уже нашли широкое аналитическое обоснование [4, 5].

Рассмотрим область практического применения результатов указанных исследований при определении нагрузки на крепь и расчете последней. Один из косвенных способов определения нагрузки основан на решении задачи о выбросах случайной функции за заданный уровень.

В качестве величины, изменяющейся по длине выработки случайным образом, принимается отношение предельной нагрузки к реально действующей, называемое в дальнейшем коэффициентом устойчивости $K_y = q_{np} / q$.

Для обеспечения эксплуатационного состояния крепи коэффициент устойчивости должен быть больше своего предельного значения, равного 1. При этом средняя длина l_y (части выработки, находящейся в устойчивом состоянии) позволяет количественно оценить устойчивость выработки:

$$W = \frac{l_y}{L}, \quad (1)$$

где L - ее общая длина.

В предположении о нормальном законе распределения задача установления общей продолжительности пребывания случайной функции выше заданного уровня, т.е. 1, формулируется как задача о выбросах, а выражение (1) может быть представлено в виде:

$$W = 1 - \Phi\left(\frac{1 - m_{K_y}}{\eta_{K_y} \cdot m_{K_y}}\right), \quad (2)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}t^2} dt$ - нормальная функция распределения (т.н. интеграл Лапласа), табулированная в [6]; m_{K_y}, η_{K_y} - среднее значение и вариация коэффициента устойчивости.

Среднее значение несущей способности крепи, как известно, зависит от ее конструкции и размера, материала и геометрических характеристик профиля, соотношения вертикальной и горизонтальной составляющих нагрузки и угла, при котором изгибающий момент максимален.

Из (2) можно получить формулу для определения средней величины нагрузки на крепь:

$$m_q = \frac{m_{q_{np}}}{1 + \frac{m_{K_y} \cdot \arg \Phi(1 - l_y / L)}{\sqrt{D_{K_y}}}}, \quad (3)$$

где $\arg \Phi(1 - l_y / L)$ - аргумент функции $\Phi(x)$ при ее значении, равном $(1 - l_y / L)$, т.е. необходимой устойчивости, учитывающей соотношение первоначальных и эксплуатационных затрат на крепление.

Очевидно, что в числителе выражения (3) находится константа для конкретных геомеханических условий разработки, знаменатель может быть определен

по данным фактических замеров, либо задан заранее.

Определенная по данной методике нагрузка на крепь будет наиболее достоверно соответствовать реальной для обеспечения требуемой (заданной) устойчивости выработки. Такой подход позволит как избежать излишнего запаса прочности (несущей способности) крепи, так и перерасхода средств на ремонт и перекрепление выработок.

Б. Расчетная схема и программа для определения внутренних силовых факторов

Расчету крепей горных выработок посвящено большое количество работ [7-10 и др.]. Основные направления и этапы развития теории расчета крепи подробно анализируются К.В. Руппенейтом, А.Н.Драновским, В.А.Дытнинным [11]. В данной работе в обобщенном и систематизированном виде излагаются теоретические основы наиболее широко используемых в практике проектирования методик расчета крепей.

Результаты расчета крепи зависят от способа определения действующей на нее нагрузки. Отличие известных методик расчета крепи состоит не только в применении различных методов расчета, но и в использовании различных моделей взаимодействия крепи с окружающими боковыми породами. Можно назвать два принципиально отличных подхода к расчету крепи. В основе первого принято предположение о том, что величина внешней нагрузки на крепь, определяемая давлением окружающих боковых пород, не зависит от деформационных свойств крепи. Второй подход требует определения нагрузки на крепь при решении задачи о совместном деформировании системы "окружающие горные породы-крепь". В первом случае крепь работает в режиме заданной нагрузки, а во втором - в режиме заданной деформации. В ряде случаев при расчете крепи эпюры нормальных и касательных нагрузок задаются на основе экспериментальных данных, полученных в натурных условиях или с помощью моделирования.

При аналитическом определении нагрузки результаты расчета крепи зависят от принимаемой модели среды окружающего породного массива: линейно-упругой, физически-нелинейной, геометрически нелинейной, вязкоупругой и прочих. Такие модели, характерные для соответствующего массива горных пород, описаны в работах.

При решении задачи о совместном деформировании системы «массив горных пород-крепь» длительное время использовалась комбинация методов конечных элементов (МКЭ) и начальных параметров в матричной форме (ММП). Метод конечных элементов при этом позволяет учесть специфические свойства породного массива, а метод начальных параметров - конструктивные особенности крепи. Эти методы обладают достаточной универсальностью и при расчете на ЭВМ стандартизуют и упрощают процесс анализа сложных статически неопределимых систем. Основные положения ММП описаны в работах В.Л.Попова с соавторами [10 и др.].

В связи с бурным развитием компьютерной техники возникла возможность просчитывать колоссальное количество вариантов исходных данных, проблема

заключается лишь разработке мощного программного обеспечения, отсутствующего в настоящее время на рынке, либо являющимися интеллектуальной собственностью владельцев.

Именно поэтому нами была предпринята попытка создания такой программы, которая позволяла бы вносить непосредственно в нее постоянные дополнения и усовершенствования. Эта программа была реализована на системе управления базами данных (СУБД) «*Visual Fox Pro 6.0*».

Выбор именно этой системы обусловлен тем, что в процессе вычислений и анализа полученной информации возникает необходимость оперировать большими объемами данных, имеющих одинаковые физические значения, но разные величины. Именно такие условия наиболее соответствуют назначению СУБД «*Visual Fox Pro 6.0*». Объединение данных в единые базы позволяет решать множественные статистические задачи, которые не могут быть решены вручную из-за громоздкости и объемности вычислений.

Использование конкретной СУБД обусловлено наличием в ней так называемой «*технологии Раумора*», разработанной фирмой *Microsoft* и позволяющей производить операции с базами данных на два порядка быстрее, по сравнению с другими аналогичными программными продуктами. Также важным фактором выбора данной СУБД является то, что «*Visual Fox Pro 6.0*» работает под операционной системой *Windows (9.X/ 2000/ XP/ Me)*. Это позволяет выполнять вычисления параллельно с другими процессами.

Программа позволяет производить вычисления различного рода параметров взаимодействия системы «крепь-массив». Примером может служить расчет реакций, возникающих при действии горного давления на стойки крепи. Зная параметры крепи и значения некоторых нагрузок и реакций, производится расчет искомых параметров. Далее программа позволяет производить накопление полученных результатов для дальнейшего анализа и статистических исследований. Простое интуитивное управление программой «Крепь» дает возможность работать с ней, имея минимум подготовки и опыта работы с компьютером.

Внедрение подобных компьютерных технологий в подземном строительстве обусловлено возрастающими потребностями обработки все больших объемов информации и сложностью расчетных схем. Программа исключает возможность влияния «человеческого фактора» на ход вычислений, в силу сложности которых возрастает возможность допущения математических ошибок. Немаловажным является возможность связи программы с приложением *Windows Excel*, а значит обработкой результатов с последующим построением графиков зависимости параметров.

Обычно при расчете крепи ее принято представлять в виде двухшарнирной арки с симметричным нагружением, сам расчет выполняется известными методами строительной механики. Статическая неопределимость рамы раскрывается методом Мора [12].

Порядок расчета при этом следующий:

– выбирается основная система, соответствующая заданной, статически неопределимой системе;

– вследствие симметрии расчетной схемы и из условия $\sum Y=0$ определяются вертикальные реакции в опорах;

– составляется столько канонических уравнений для основной системы, сколько лишних неизвестных реакций. Коэффициенты δ_{1l} и свободные члены Δl_p канонических уравнений вычисляются по сокращенным формулам, не учитывающим нормальные и поперечные сил ввиду их незначительного влияния на конечный результат;

– вычисленные коэффициенты и свободные члены подставляются в канонические уравнения, совместное решение которых определит численные величины неизвестных сил или моментов;

– определяются опорные реакции заданной системы и строятся эпюры M , Q , N .

Криволинейная часть арки на первом этапе расчетов принимаем очерченной постоянным радиусом R_0 .

Решение уравнений представляет собой довольно громоздкую и трудоемкую операцию, и путем ряда преобразований конечные формулы могут быть значительно упрощены путем выражения одних параметров через другие.

Важный этап расчета – определение горизонтального распора исходя из предположений о нулевом перемещении нижнего конца стойки, хотя в дальнейших расчетах вместо нуля будут подставляться реальные значения перемещений, полученные в результате шахтных измерений.

В расчетной практике удобнее пользоваться не истинным значением изгибающего момента, а его относительной, безразмерной величиной, т.е. значением момента, отнесенного к произведению конструктивного параметра – радиуса выработки и определенного значения вертикальной нагрузки.

Отношение вертикальной и боковых нагрузок обозначим через λ , т.е. $q_6 = \lambda q_8$. Кроме того, целесообразно в дальнейших расчетах выразить величину значения прямой части стойки арки h_{cm} через радиус выработки R_0 отношением K . Для типовых сечений горных выработок отношение $K=h_{cm}/R_0$ колеблется в пределах 0,34...0,67, причем изменение его в указанном интервале практически не влияет на конечные результаты. Поэтому в дальнейшем принимаем $K=0,67$ как константу.

В дальнейшем представляется возможным определить наиболее оптимальную с точки зрения возникновения внутренних усилий форму сечения крепи. Для этого необходимо приравнять полученные уравнения для определения изгибающих моментов к нулю, при этом открывается возможность определить для каждой конкретной точки в криволинейной части крепи свой радиус кривизны. Очевидно, что выполнять это для каждой точки нецелесообразно и нетехнологично при изготовлении самой крепи, поэтому можно будет принять два некоторых средних значения.

Нижняя же часть крепи также может быть представлена криволинейным очертанием, приближаясь к эллипсной или овоидальной. Для этого при определении горизонтального распора приравняем его не к нулю, как это делается в каноническом уравнении метода сил, а к реальному значению, определенному в

натурных условиях. По данным измерений, выполняемых, например, на шахтах ГП «Добропольеуголь», это значение загиба стоек во внутрь выработки обычно находится в пределах $0,1 \dots 0,3$ м.

Составим уравнение моментов от внешних сил для криволинейной стойки. Предварительно введем новую константу $c = l/R_0$ - отношение величины загиба стоек к радиусу выработки:

$$M_x = -\frac{\lambda q y^2}{2} - \frac{q x^2}{2} - q R_0 (R_0 c - x) - N R_0 q y. \quad (4)$$

Приравняв полученное выражение к нулю, и решив его относительно x , получим координаты оптимальной формы кривизны стойки, в которой изгибающие моменты будут практически отсутствовать:

$$-\frac{\lambda q y^2}{2} - \frac{q x^2}{2} - q R_0 (R_0 c - x) - N R_0 q y = 0. \quad (5)$$

Выразив y через радиус выработки

$$y = m K R_0, \quad (6)$$

где $0 \leq m \leq 1$ - условная часть высоты стойки, получаем

$$\frac{x}{R_0} = 1 - \sqrt{1 - \lambda m^2 K^2 - 2c - N m K}. \quad (7)$$

Определяя значения x/R_0 при $K = 0,67$ и $c = 0,25$ при различных значениях x , сводим их в табл. 1

Таблица 1 – Результаты расчета криволинейной формы стойки (x/R_0)

| Условная высота стойки m | Значения коэффициента бокового давления λ | | |
|----------------------------|---|------|------|
| | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| 0 | 0,29 | 0,29 | 0,29 |
| 0,1 | 0,27 | 0,26 | 0,26 |
| 0,2 | 0,24 | 0,23 | 0,23 |
| 0,3 | 0,21 | 0,2 | 0,19 |
| 0,4 | 0,18 | 0,17 | 0,15 |
| 0,5 | 0,15 | 0,13 | 0,11 |
| 0,6 | 0,13 | 0,1 | 0,08 |
| 0,7 | 0,09 | 0,06 | 0,03 |
| 0,8 | 0,06 | 0,03 | 0,01 |
| 0,9 | 0,03 | 0,0 | 0,0 |
| 1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

Внутренние усилия в рассматриваемом случае могут быть определены по формуле

$$\frac{M_{\varphi}}{qR_0^2} = -N \sin \varphi - NK + \frac{\sin^2 \varphi}{2} - \frac{\lambda \sin^2 \varphi}{2} - \lambda K \sin \varphi - \lambda \frac{K^2}{2}. \quad (8)$$

Подставляя в формулу (8) наиболее близкое к реальным условиям значения $\lambda=0.3, 0.4$ и 0.5 и приравняв, после некоторого преобразования, к нулю, определяем значения радиуса выработки в зависимости от угла нахождения рассматриваемой точки.

Полученная в результате форма крепи по своему очертанию очень близка к конструкции КМП-АЗР2, разработанной совсем недавно в Западно-Донбасском научно-производственном центре «Геомеханика». Такая крепь имеет форму овоида, максимально приближенную к эллипсу.

Выводы

К комплексу задач, решение которых может обеспечить устойчивость подземных горных выработок на протяжении всего периода эксплуатации следует отнести:

- методики оптимального проектирования горных выработок и планирования ремонтно-восстановительных работ;
- обоснование параметров и форм шахтных крепей;
- усовершенствование материалов для производства крепей и повышение их качества;
- применение дешевых, но достаточно эффективных способов поддержания выработок в устойчивом состоянии;
- повышение качества работ при установке и эксплуатации крепи.

Таким образом, в общем комплексе горных работ одним из узких мест продолжает оставаться устойчивость выработок. Рассмотрение и успешное решение задачи улучшения основных параметров рабочей характеристики податливых крепей неизбежно затрагивает общую проблему ресурсосбережения. Повышение рабочего сопротивления комплекта позволяет вполне обоснованно варьировать плотность установки крепи в сторону ее уменьшения, что дает результат уже на стадии сооружения выработки. Достичь этого можно изменением типа крепежной рамы и замковых соединений.

Очевидно, что определенные успехи в этом направлении уже получены, однако, большое разнообразие горно-геологических условий не позволяет выдавать однозначные рекомендации по всеобщему применению того или иного решения. Поэтому проблема научно обоснованного изменения типа крепежной рамы продолжает оставаться открытой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартиненко С.В. Про можливість підвищення несучої здатності профілю СВП // Науковий вісник НГА України. – 1999. - №5. - С.23-25.
2. Гамаюнов В.В. Проблемные вопросы обеспечения устойчивости капитальных горных выработок уголь-

ных шахт // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки НАН України. – Дніпропетровськ. – 2002. – Вип. 40. – С.181-186.

3. Мартиненко С.В. Аналіз конструкцій і роботи вузлів піддатливості кріплення та шляхи їх удосконалення // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2003. – Вип.4(21). – С.150-152.

4. Шашенко А.Н., Сургай Н.С., Парчевский Л.Я. Методы теории вероятностей в геомеханике. – К.: Техніка, 1994. – 216 с.

5. Шашенко А.Н., Тулуб С.Б., Сдвижкова Е.А. Некоторые задачи статистической геомеханики. – К.: Пульсари, 2002. – 302 с.

6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Физматгиз. – 1969. – 572 с.

7. Булычев Н.С., Амосин Б.З., Оловянный А.Г. Расчет крепи капитальных горных выработок. – М.: Недра, 1974. – 256 с.

8. Баклашов И.В., Тимофеев О.В. Конструкции и расчет крепей и обделок. – М.: Недра, 1979. – 313 с.

9. Руппенейт К.В. Некоторые вопросы механики горных пород. – М.: Углетехиздат, 1954. – 384 с.

10. Попов В.Л., Каретников В.Н., Еганов В.М. Расчет крепи подготовительных выработок на ЭВМ. – М.: Недра, 1978. – 230 с.

11. Руппенейт К.В., Драновский А.Н., Лыткин А.В. Расчет сборной кольцевой крепи подземных сооружений. – М.: Недра, 1969. – 150 с.

12. Рачинский В.М. Расчет статически неопределимых систем. – М.: Ин-т нефтехим. и газ. пром-ти, 1959. – 28 с.

УДК 622.831.325.3

Л.А. Новиков, Т.В. Бунько,
И.Е. Кокоулин, Б.В. Бокий

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДЕГАЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Розглянуто процес утворення водяної пробки на ділянці трубопроводу, а також питання підвищення ефективності функціонування дегазацийних систем вугільних шахт, за рахунок використання прогресивних автоматизованих систем

INCREASE EFFECTIVE OF COAL MINES DEGASATION SYSTEMS

The process formation of a water fuse on a site pipeline, and also question improvement of functioning of coal mines degasation systems is considered, at the expense of use progressive automated systems

При разработке угольных пластов на больших глубинах в условиях высокой метанообильности разрабатываемых пластов первоочередной задачей является обеспечение безопасных условий труда обслуживающего персонала. Вероятность возникновения ситуаций, опасных по газовому фактору, зависит от эффективности работы вентиляционной и дегазационной систем.

Эффективность работы дегазационной системы (ДС) зависит от степени ее соответствия показателям, предусматриваемым на стадии проектирования, и нормативным показателям. В настоящее время на многих шахтах угольной отрасли ДС имеют низкие показатели эффективности функционирования, в связи с чем возникает необходимость в их усовершенствовании и реконструкции. При этом необходимо учитывать взаимодействие основных элементов ДС между собой и с внешней средой, а также изменение с течением времени топологии