

УДК 622.28

проф. Литвинский Г. Г.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, ligag@ya.ru)

ГОРНАЯ КРЕПЬ: ЭВОЛЮЦИЯ РАЗВИТИЯ И КРИТЕРИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Дан краткий анализ существующих конструкций горной крепи. Показана диалектика её эволюции и прослежены тенденции развития. Сформулированы основные технические требования к деформационно-силовым показателям крепи. Обоснованы нормированные критерии её эффективности и работоспособности. Проведено численное сравнение эффективности разных крепей, выполнен анализ и прогноз эволюции их развития.

Ключевые слова: горная выработка, горная крепь, диалектика эволюции крепи, требования к крепи; деформационно-силовые показатели; коэффициент качества материала крепи; критерии эффективности и работоспособности, сравнение крепей, прогноз развития.

1 Актуальность и цель исследований

Крепление является одним из основных процессов при сооружении горных выработок и подземных объектов, а конструкция крепи — наиболее значимой статьёй расходов, удельный вес которой составляет от 40 до 70 % общих затрат. В зависимости от горно-геологических условий, форм проявлений горного давления (ПГД) и условий эксплуатации горной выработки нашли применение самые разнообразные типы крепи. Их появление было исторически обусловлено уровнем развития горной техники, требованиями безопасности и технико-экономической целесообразности [1–3].

Ретроспективный анализ последовательности развития конструкций крепи показал, что они прошли длительный и разветвлённый путь развития от простейших деревянных стоек до сложных комбинированных рамных и сплошных конструкций из разных материалов, главным образом из стали, бетона и железобетона [3, 4].

В настоящее время самой распространённой в горной промышленности (80–90 % протяжённости всех подготовительных выработок) стала стальная податливая крепь арочной и, много реже, трапециевидальной формы, выполненная из спецпрофиля СВП [1, 5]. Широкое распространение рамной крепи обусловлено её основ-

ными преимуществами — конструктивной податливостью, простотой изготовления, установки и ремонта. Однако эффективность применения этой крепи во многих случаях остаётся довольно низкой.

Эффективность инженерных решений по выбору крепи можно оценить с позиции успешности выполнения её основного назначения — устойчивости выработок. Для этого введём градацию крепей по результатам правильности принятых инженерных решений:

- удовлетворительно соответствует горно-геологическим условиям и нормам эксплуатации выработки — правильный выбор;
- недостаточно прочна, устойчива и надёжна, в итоге оказалась недопустимо деформированной — ошибка проектирования I рода;
- крепь принята с излишним запасом прочности — ошибка проектирования II рода.

Как показано в работе [5], около 20–30 % всей протяжённости подготовительных выработок находятся в неудовлетворительном состоянии и нуждаются в ремонте и перекреплении (ошибка I рода). Остальные 30–40 % закреплены с излишними расходами и могут охраняться менее мощными конструкциями крепи (ошибка II рода) и только 35–45 % отвечают условиям нормальной эксплуатации. Следует иметь в виду, что часто труднее всего идентифи-

цировать ошибку проектирования II рода, поскольку для этого необходим постоянный мониторинг состояния крепи разных конструкций.

Такой относительно низкий уровень надёжности инженерных решений в области крепления обусловлен неудовлетворительным объёмом и низким качеством исходных данных при проектировании, а также высокой изменчивостью и большим разнообразием горно-геологических условий. Созданное в горной отрасли положение с эффективностью поддержания горных выработок нельзя признать удовлетворительным.

Очевидно, что остаётся ещё достаточно много альтернативных вариантов создания новых конструкций крепи, что требует адекватной их оценки. Поэтому разработка теоретически обоснованных критериев эффективности и новых конструкций крепи является актуальной задачей для горной науки и промышленности. В частности, до настоящего времени остаются нерешёнными вопросы оценки и обоснованного эффективного выбора их конструкции.

Цель исследования — дать анализ эволюции развития горной крепи и обосновать критерии её эффективности.

Идея работы состоит в использовании безразмерных нормированных критериев технической эффективности крепи при анализе и оценке её конструкций.

Объектом исследования являются горные крепи различных конструкций и их технические показатели, **предметом** — закономерности эволюции, эффективность крепей и прогноз их развития.

Исходя из этого, **задачами исследования** являются:

1) краткий анализ эволюции развития крепи и формулирование требований к ней, исходя из особенностей её взаимодействия с массивом горных пород;

2) обоснование и разработка нормированных критериев технической эффективности горных крепей;

3) сравнение различных типов крепи на основе предложенных критериев её техни-

ческой эффективности и прогноз вектора её эволюции.

Решение поставленных задач позволит систематизировать, упорядочить и провести сравнительную оценку существующих и наметить пути создания новых конструкций горной крепи.

2 Вектор эволюции конструкций горной крепи

По области применения все крепи подразделяются на три большие группы в зависимости от назначения и требований к ним: для капитальных, подготовительных и очистных выработок. В нашем исследовании будут рассмотрены в основном крепи для подготовительных выработок.

Конструкции крепи прошли длительный путь развития и совершенствования. Если представить исторические этапы развития горной крепи в виде линейной цепочки, то в предельно упрощённом виде она выглядит как линейный граф (рис. 1), который можно условно назвать основным вектором развития («мэйнстримом эволюции») конструкций крепи. Попутно отметим, что именно в такой исторически обусловленной последовательности появления конструкций целесообразно изучать крепи в вузах горного профиля. От простейшей исходной крепи в виде стойки шло постоянное усложнение конструкций при увеличении многообразия их типов.

По мере ухудшения горно-геологических условий (сочетаний напряжённо-деформированного состояния горного массива и физико-механических свойств горных пород) происходило усиление негативного влияния ПГД на состояние горных выработок.

Своды естественного равновесия в кровле и почве горных выработок, возникающие в основном на «малых» глубинах разработки, повсеместно сменились обширными и неравномерно распределёнными вокруг выработок зонами предельных деформаций, что характерно для разрушения пород от сжатия на «больших» глубинах разработки [6].

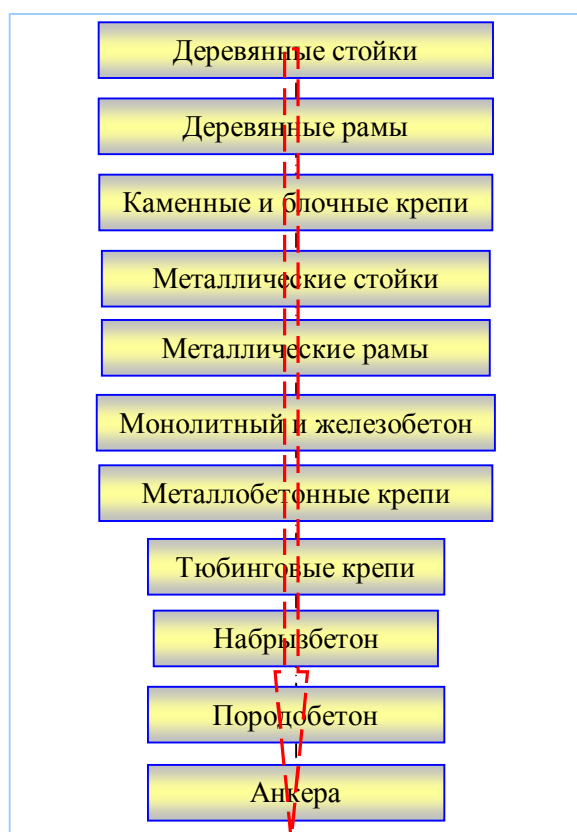


Рисунок 1 Этапы технической эволюции горной крепи в виде линейного графа

Поэтому конструкции крепи с жёстким режимом (заданных смещений) взаимодействия крепи с массивом горных пород были постепенно заменены на крепи с режимом заданных нагрузок, который требует перехода на податливые (адаптивные к смещениям) типы крепи.

Чтобы не прибегать к объёмному и кропотливому рассмотрению многочисленных типов крепи, удобнее рассмотреть более подробно лишь два наиболее показательных из них, которые отражают многие особенности развития остальных конструкций. Выделим для анализа среди множества крепей две базовых конструкции: стойку и анкер. Они расположены с противоположных концов вектора эволюции конструкций горной крепи — в его начале и в конце.

Исходя из общих положений диалектики, можно считать, что весь цикл исторического развития крепи прошёл по классиче-

скому принципу диалектической триады: «тезис-антитезис-синтез». Здесь в качестве *тезиса* условно можно считать начальный этап создания крепи (стойка), *антитезисом* — современный этап её развития в виде анкера, а *синтез* — как разрешение диалектических противоречий между ними. Поэтому «*синтез*» следует трактовать в форме появления новых конструкций крепи как «снятие» технических противоречий в этой области горной техники.

Стойка являет собой исторически первую крепь простейшей конструкции, тогда как анкер в определённом смысле замыкает современный этап развития технологии крепления.

Поучительно проследить сходство и отличия функциональных и конструктивных признаков таких, на первый взгляд, мало похожих типов крепи — рамной и анкерной (рис. 2 и 3).

Разумеется, существует большое разнообразие этих конструкций крепи, в том числе и комбинированных. Но во всех этих конструкциях стойки и анкера взаимодействуют с породным массивом в соответствии с присущими им различными закономерностями. Рамная крепь в качестве основного несущего конструктивного элемента использует шахтные стойки, а анкерная крепь — анкер. Остальные элементы крепи (межрамные ограждения, верхняки, штрипсы и т. д.) выполняют вспомогательные функции. Поэтому мы сосредоточим своё внимание на основных грузонесущих элементах крепи — стойке и анкере.

Стойка является простейшей и самой доступной конструкцией крепи, она положила начало развитию этого направления горной техники и технологии. Исторически появление стойки как элемента крепи заставило практиков приспособлять её к различным условиям, в которых находились горные выработки. Постепенно стойка получила развитие путём усложнения конструкций с целью обеспечения безопасности ведения горных работ. Необходимость ограждения породного контура

выработки от падения вывалов и породных обломков обусловило появление рамных, а в дальнейшем и сплошных конструкций крепи. Анкер, в свою очередь, является как бы антиподом стойке и оказался на завершающем этапе эволюции крепи, в нём получили применение новые горные технологии и материалы (бурение, химические растворы, высокопрочные стали и пр.). Тем не менее обе сравниваемые конструкции, несмотря на принципиальные различия, имеют много общего.

С этой целью выделим общие признаки, присущие стойке и анкеру:

1. Одинаковый способ взаимодействия с массивом путём создания отпора в виде сосредоточенной силы, приложенной в точке к породному контуру непосредственно или через дополнительные элементы.

2. Обе конструкции предназначены для работы под действием осевой (направленной вдоль продольной оси) нормальной силы, возникновение изгибающих моментов или поперечных сил является крайне нежелательным.

3. Эффективность крепи существенно повышается при создании предварительного распора в момент установки.

4. В условиях больших смещений породного контура, при образовании зоны запредельных деформаций вокруг выработки, крепи необходимо обеспечить податливый режим работы.

5. Для предотвращения вывалов породы на соседних с крепью участках обе конструкции нуждаются в ограждении породного контура (затяжке).

Полезно рассмотреть и важные отличия стойки и анкера, чтобы выделить их как этапы эволюции крепи:

1. Если стойка предназначена для восприятия сжимающей нормальной силы («работает на сжатие»), то анкер является единственной конструкцией крепи, которая работает на «чистое» растяжение.

2. Стойка всегда располагается внутри горной выработки и имеет два контакта на породном контуре, а анкер, напротив, раз-

мещён в окружающем массиве горных пород с одним контактными участком на контуре выработки, поэтому условно можно считать, что по воздействию на породный контур одна стойка конструктивно равна двум анкерам.

3. Одним из самых опасных для стойки состояний является появление эксцентриситета у продольной силы, что приводит к изгибу и последующей потере устойчивости стойки, тогда как у анкера этот эксцентриситет при увеличении нагрузки уменьшается и не опасен.



Рисунок 2 Простейшая деревянная крепь «две стойки под распил» при потере устойчивости стоек



Рисунок 3 Буроинъекционные анкера ГЕОКРЕП

4. У стойки необходимо обеспечить шарнирный распор обеих её концов на породе для исключения эксцентриситета нагружения, что для анкера необязательно, и его концы взаимодействуют с породой в жёстко защемлённом состоянии.

5. Критическим предельным состоянием для стойки является потеря продольной устойчивости (по Эйлеру), тогда как анкер разрушается при наступлении первого предельного состояния путём разрыва штанги с образованием «шейки».

Переход горных работ на всё большие глубины разработки вызвал кардинальную смену парадигмы методов управления ПГД. Принципиально изменились законы и форма ПГД: первая фундаментальная закономерность (I-ФЗ) ПГД сменилась на вторую (II-ФЗ). Это значит, что разрушение пород вокруг выработок напряжениями растяжения заместилось разрушением от сжимающих напряжений. Вывалы и своды естественного равновесия (СЕР) были вытеснены разнообразными формами зон запредельных деформаций (ЗЗД) вокруг выработки, что сопровождалось значительными смещениями, неравномерным нагружением крепи, выдавливанием и обрушениями пород в выработку [6].

Кардинальная смена форм ПГД заставила горных инженеров пойти по пути создания криволинейных и даже замкнутых мощных грузонесущих конструкций крепи для капитальных выработок (блочные, монолитные, металлобетонные, тубинговые и породонесущие конструкции). Для подготовительных и вспомогательных выработок развитие крепи пошло по принципиально иному направлению, основанному на создании не жёстких, а податливых рамных, анкерных и смешанных конструкций. Именно это направление оказалось самым плодотворным и эффективным.

3 Разработка и обоснование основных требований к горной крепи

Кратко рассмотрим основные требования, которым должны отвечать горные

крепи как типичные представители горной техники. Обычно требования к сравниваемым промышленным объектам подразделяются на технические, эксплуатационные и экономические, причём их выбор и формулирование сводится к нередко формальному и мало систематизированному набору общих показателей.

Опираясь на рекомендации работы [7], для проведения сравнительной оценки технического уровня образцов горной техники необходимо использовать комплекс показателей, позволяющих сопоставить её эффективность по различным характеристикам, которые можно разбить на несколько групп:

- габаритные размеры и другие геометрические параметры горной машины и отдельных её элементов;
- показатели условий применения техники (горно-геологические и горно-технические данные);
- энерго-механические параметры (тип энергии, установленная мощность двигателей на исполнительном органе, на погрузке, движителе, КПД и т. д.);
- показатели технической и эксплуатационной производительности, надёжность, коэффициент готовности;
- технические параметры отдельных систем и условий их эксплуатации;
- требования безопасности, комфортности, охраны труда;
- технико-экономические данные (стоимость, окупаемость, ремонтпригодность и пр.).

Целесообразно конкретизировать эти общие показатели и сосредоточиться на технических требованиях, предопределяющих особенности конструктивных решений крепи, при одновременном максимальном удовлетворении эксплуатационных условий их использования.

Требования к горным крепям, помимо известных общетехнических и экономических, следует сформулировать главным образом на основе особенностей функционального их использования в качестве самостоятельного или конструктивного эле-

мента поддержания горной выработки. А такое использование предполагает в первую очередь контактное взаимодействие крепи с породным контуром, что предопределяет наиболее важные требования к ней, формирующие силовое и деформационное взаимодействие с массивом горных пород.

Условия силового взаимодействия с породным массивом порождают следующие технические требования:

- 1) высокая грузонесущая способность;
- 2) рабочее сопротивление конструкции должно быть близким к предельной несущей способности крепи;
- 3) возможность предварительного (начального) распора и обеспечение его максимального значения;
- 4) минимизация концентрации напряжений на участке контакта крепи (например, концов стойки) с массивом горных пород;
- 5) быстрый набор рабочего сопротивления при нагрузке со стороны пород;
- 6) простая и удобная разгрузка крепи от внешнего давления при её извлечении;
- 7) возможность контроля усилий на контакте «крепь-массив» и управления ими.

Для обеспечения деформационного взаимодействия с массивом горных пород, крепи должны удовлетворять следующим требованиям:

- 1) обеспечивать максимально возможную раздвижность при установке, т. е. нужный запас податливости;
- 2) иметь плавную, без рывков податливость под действием нагрузки, когда она превысит уровень рабочего сопротивления;
- 3) при исчерпании запаса податливости переходить в жёсткий режим работы с предельным усилием отпора;
- 4) сохранять продольную устойчивость сжатых элементов (стоек, стен) под нагрузкой;
- 5) не деформировать (сминать или раздавливать) породы на контакте с опорами.

Сформулированные требования относятся лишь к деформационно-силовым характеристикам крепи, которые отражают эксплуатационно-функциональные особен-

ности её работы при взаимодействии с породным массивом. Эти требования не являются исчерпывающими и нуждаются в дополнении технико-экономическими показателями для полноты рассмотрения и достоверного суждения при сравнении и выборе возможных конструкций крепи.

Исходя из требований по соблюдению деформационно-силовых характеристик, можно перейти к формулированию критериев эффективности горной крепи.

4 Требования к критериям оценки эффективности горной крепи

Чтобы получить объективные критерии эффективности, следует их формировать в виде безразмерных симплексов с использованием лишь самых важных показателей. Учитывая недостаточно достоверный характер, либо отсутствие некоторых исходных технических данных в доступной для анализа текущей информации, желательно выбрать такие комбинации показателей, которые охватывают как можно более стабильные и распространённые свойства конструкции.

К техническим данным, чаще всего приводимым в технических характеристиках горной крепи, можно отнести (в скобках указаны обозначения размерности [L] — длина; [t] — время; [m] — масса; [F] — сила):

- А — габаритные размеры (длина, ширина, высота), м, [L];
- V — условный объём крепи, м³, [L³];
- М — масса данного образца крепи (т), [m];
- γ — плотность материала крепи, кг/м³, [m/L³];
- F — рабочее сопротивление (грузонесущая способность) крепи, Н;
- U — конструктивная податливость в направлении преобладающей нагрузки со стороны пород, м.

Эти параметры подлежат уточнению для каждого типа крепи. Так, например, для шахтных стоек определяющим линейным размером будет их максимальная длина L , а для рамной или сплошной крепи — размер

выработки в направлении максимальных нагрузок. Массу крепи следует относить либо к отдельному конструктивному её элементу (стойка, крепёжная рама), либо для сплошных конструкций — массу, приходящуюся на 1 м длины выработки.

К одному из основных требований при формировании критериев относится их неизменность (инвариантность) в отношении «масштабного» фактора. Под «масштабным» фактором понимается изменение численной величины любого из показателей при пропорциональном изменении размеров конструкции. При этом, как правило, таких критериев может быть несколько, поэтому поставленная задача выбора эффективной крепи относится к многокритериальному классу.

Будем опираться на результаты работы [7], где приведена общая методика построения критериев для сравнительной оценки уровня эффективности горной техники и технологии. Согласно этой методике, вначале следует выделить наиболее значимые технические показатели крепи, которые определяют эффективность её применения. К таким результативным показателям для деформационно-силовых свойств крепи следует отнести:

- предельную несущую способность P (кН) и рабочее сопротивление F (кН);
- определяющие крепь геометрические размеры: длину L (м) и конструктивную податливость («раздвижность») U (м);
- полную массу крепи M (кг).

Из совокупности наиболее достоверных данных желательно получить некоторые критерии (показатели), которые условно можно использовать для сравнительной оценки разных типов крепи.

Всегда возможно для единообразия так сформировать эти показатели, чтобы они при своём возрастании указывали на повышение технических качеств объекта изучения. Иными словами, когда первая производная от выбранного результативного показателя по времени положительна, это отражает положительную тенденцию.

Кроме того, как это отмечалось выше, изменение масштаба любого вида техники не должно приводить к заметному изменению значения показателя.

Независимо от способа формирования набор показателей (критериев) в многокритериальной задаче должен удовлетворять определённым требованиям [7]:

- **Полнота.** Использование любых дополнительных критериев не изменяет результатов решения задачи.

- **Декомпозируемость.** Набор критериев обеспечивает возможность разбиения сложной задачи на отдельные, более простые части.

- **Неизбыточность.** Различные показатели (критерии) не должны учитывать один и тот же аспект последствий.

- **Минимальность.** Набор должен содержать как можно меньшее количество критериев.

- **Измеримость.** Каждый критерий должен допускать возможность оценки интенсивности характеризуемого им свойства.

Используя основные положения теории подобия и размерностей, можно предложить несколько основных критериев технической эффективности крепи.

5 Коэффициент конструктивного качества материала крепи

В первую очередь желательно учесть влияние на оценку конструктивных параметров крепи свойств материала — его прочности и плотности — с тем, чтобы можно было сравнивать конструкции крепи из разных материалов.

Для этого следует воспользоваться коэффициентом конструктивного качества материала k_M [1] в виде отношения несущей способности условного куба данного материала с ребром 1 м к его массе:

$$k_M = \frac{F_1}{M_1} = \frac{[\sigma] \cdot A_1}{\gamma \cdot V_1} = \frac{[\sigma]}{\gamma}, \quad (1)$$

где $[\sigma]$ — предел прочности материала крепи на один из видов нормативных на-

грузок (одноосное сжатие или растяжение, изгиб и др.), действующих на крепь, кПа;

γ — плотность материала крепи, кг/м³;

$A_1 = 1$ — площадь грани условного единичного куба, м²;

$V_1 = 1$ — объём того же единичного куба, м³.

Таким образом, коэффициент конструктивного качества материала k_M показывает, какую прочность может обеспечить его масса, сосредоточенная в единице объёма, а размерность его равна кН/кг.

Значения коэффициентов конструктивного качества для разных материалов приведены в таблице 1 в порядке убывания коэффициента k_M при сжатии. Расчёты проведены по данным справочника для крепления и могут колебаться в пределах $\pm 20-30\%$, что позволяет вполне надёжно выделить главные тенденции.

Довольно неожиданным оказалось, что на сжатие наилучшими материалами являются сосна (позиция 2) и дуб (позиция 3), пропустив на первое место только высокопрочную легированную сталь 30ХГС с коэффициентом качества $k_M = 14$ кН/кг, одинаковым для растяжения и сжатия. Обычные стали Ст3 и Ст5 (позиции 4 и 5 в таблице 1) с $k_M = 4,8$ и $6,4$ кН/кг уступили по конструктивному качеству дубу и сосне с коэффициентами соответственно $k_M = 6,5$ и $6,7$ кН/кг.

Самый низкий ранг по качеству при сжатии имеют набрызгбетон (поз. 6) и бетон (поз. 7) с соответствующими коэффициентами $k_M = 2,3$ и $1,4$ кН/кг, т. е. на порядок меньше, чем дерево.

Более наглядно сравнение материалов по их коэффициентам конструктивного качества k_M можно проследить по гистограммам на рисунке 4.

Из полученных данных следует, что при ранжировании материалов по убыванию значений k_M при сжатии они расположились по номерам, приведённым в таблице 1.

Таблица 1
Коэффициенты конструктивного качества k_M
для разных материалов крепи

Материал	объёмная масса, кг/м ³	Временное сопротивление, МПа		k_M , кН/кг	
		растяж.	сжатие	растяж.	сжатие
1 Сталь 30ХГС	7850	1100	1100	14,0	14,0
2 Сосна	600	120	40	20,0	6,7
3 Дуб	800	145	52	18,1	6,5
4 Сталь Ст5	7850	600	500	7,6	6,4
5 Сталь Ст3	7850	380	380	4,8	4,8
6 Набр.-бетон	2200	4	50	0,2	2,3
7 Бетон	2200	2	30	0,1	1,4

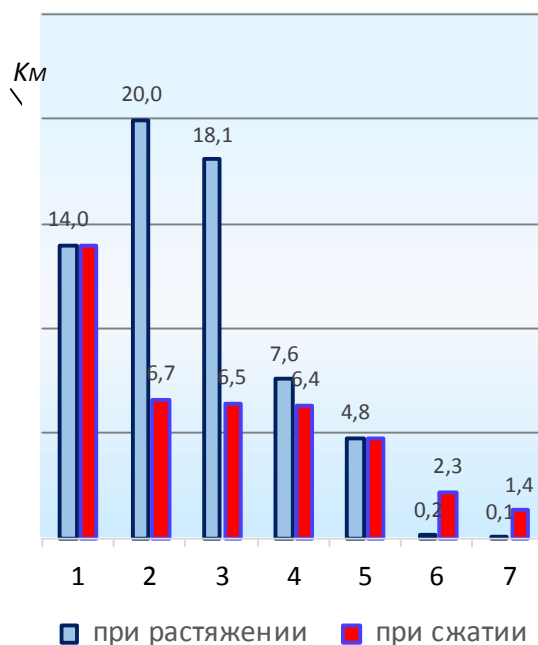


Рисунок 4 Гистограмма коэффициентов конструктивного качества различных материалов крепи (согласно табл. 1) при их растяжении и сжатии

При сравнении материалов по коэффициенту конструктивного качества k_M при растяжении максимум имеют сосна (п. 2), у которой $k_M = 20$ кН/кг и дуб (п. 3) со значением $k_M = 18$ кН/кг. Далее по убыванию следуют

стали (ранжированные места 4, 5), а в самом конце наихудшие показатели у набрызгбетона (п. 6) и бетона (п. 7) с коэффициентами качества соответственно $k_M = 0,2$ и $0,1$ кН/кг.

Итак, деревянные материалы крепи (сосна и дуб) оказались явными фаворитами по сравнению с другими материалами по растяжению и примерно сопоставимы со сталью при сопротивлении сжимающим нагрузкам. Однако следует иметь в виду, что в крепях деревянные материалы используются именно в сжатых элементах (стойки), где их преимущества при нагрузках на растяжение нивелируются. Кроме того, для капитальных выработок дерево как материал крепи ограничено иными негативными показателями (пожароопасность, малый срок службы, плохая сочетаемость с другими материалами и др.).

Коэффициент конструктивного качества материала k_M , как следует из его определения, имеет размерность кН/кг и не является нормированным, и он удовлетворяет только условию в виде неравенства $k_M > 0$. Тем не менее он полезен для построения критериев эффективности крепи и будет там использован.

6 Обоснование критериев технической эффективности горной крепи

Геомеханические показатели крепи для отражения особенностей её взаимодействия с массивом горных пород полностью описываются её деформационно-силовой характеристикой в виде некоторой функциональной зависимости, которую можно представить в общем виде как

$$f(F, U, t) = 0, \quad (2)$$

где $U(t)$ — конструктивная податливость крепи (смещения грузонесущих её элементов в направлении действия нагрузки), м;

$F(t)$ — грузонесущая способность крепи, кН;

t — текущее время взаимодействия крепи с окружающим породным массивом при её эксплуатации, с.

Как видим, деформационно-силовые параметры крепи явным или неявным образом существенно зависят от времени t . Это намного усложняет решение основной геомеханической задачи о выборе крепи и обоснование её геомеханических параметров $U(t)$ и $F(t)$.

Заметно упростить решение этой задачи по креплению горных выработок способны критерии технической эффективности крепи. Такие критерии могут наиболее полно отражать силовые $F(t)$ и деформационные $U(t)$ резульативные показатели крепи.

Используя основные положения теории подобия и размерностей, как правило, можно предложить несколько критериев технической эффективности. При этом желательно обеспечить условие нормировки, когда у каждого из критериев диапазон возможного изменения заключён в пределах от -1 до 1 . Или, когда показатели по физическому смыслу не принимают отрицательных значений, критерий должен быть в пределах от 0 до 100% , что по смыслу равноценно, но более удобно для сравнения. В результате получим так называемые нормированные критерии технической эффективности — **НКТЭ**. После этих общих требований перейдём к выбору и обоснованию НКТЭ конкретно для горной крепи.

Для отражения адаптивных свойств крепи при работе в условиях больших смещений можно ввести деформационный критерий эффективности K_D в виде отношения

$$K_{Di} = k_n \frac{U_i}{L_i} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где U_i — конструктивная податливость крепи в заданном направлении смещений $i = 1, 2, \dots, n$ (вертикальном, наклонном, горизонтальном и т. д.), м;

L_i — линейный размер крепи до реализации податливости в направлении смещений породного контура, м;

k_n — нормирующий множитель, $k_n = 2$.

Нормирующий множитель выбираем таким образом, чтобы искомый критерий эффективности всегда удовлетворял неравенству $0 \leq K_{Di} \leq 100\%$. Обычно податливость конструктивно реализуется путём раздвижности элемента крепи, поэтому всегда размер выработки L_i или полная длина элемента больше его одинарной раздвижности U_i не менее чем в два раза, а для двойной раздвижности — в три раза; соответственно, нормирующие множители будут равны $k_n = 2$ и $k_n = 1,5$.

Очевидно, для жёстких конструкций крепи, у которых конструктивная податливость, если пренебречь упругими их деформациями, равна $U_i = 0$, деформационный критерий принимает, согласно (1), минимальное значение $K_D = 0$. Максимальным значением деформационного НКТЭ будут обладать податливые крепи типа стоек трения или гидростоек, у которых он доходит до $K_D = 80\%$ и более.

Конкретно для податливой шахтной стойки одинарной раздвижности, у которой лишь одно направление податливости, совпадающее с её продольной осью, получаем $k_n = 2$ и формула принимает следующий вид:

$$K_D = 2 \frac{U}{L} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Для критериальной оценки силовых показателей крепи при её взаимодействии с массивом горных пород введём силовой критерий эффективности K_F , по аналогии с коэффициентом конструктивного качества материала k_M , в виде

$$K_F = k_n \frac{F_k}{M_k}, \quad (5)$$

где k_n — нормирующий множитель, который вводится с той целью, чтобы значение критерия эффективности находилось в пределах $0 \leq K_F \leq 1$;

F_k — грузонесущая способность (рабочее сопротивление) крепи, кН;

M_k — масса крепи (рамы или 1 м сплошной крепи), кг.

Полная определённость при выборе грузонесущей способности F_k существует только для крепей, обладающих точечным контактом с породным массивом: стойки и анкера. У всех остальных конструкций крепи (рамных и сплошных) грузонесущая способность может изменяться в разы в зависимости от условий контакта с породой и закона распределения внешней нагрузки. Ввиду этого чаще всего используют данные технического паспорта, полученные для идеализированных горно-геологических условий и полного соблюдения ТУ изготовления, технологии возведения и эксплуатации крепи.

Особо остановимся на выборе нормирующего множителя k_n . Если внимательно изучить структуру формулы (5), станет понятным её физический смысл: критерий показывает, какую часть грузонесущей способности (рабочего сопротивления) приходится на единицу массы крепи. Совершенно очевидно подобие предложенного критерия по своему смыслу, структуре и размерности коэффициенту конструктивного качества материала k_M из формулы (1). Также понятно, что, исходя из физического смысла выражений (1) и (5), всегда соблюдается неравенство $k_M \geq K_F$. Поэтому естественным образом вытекает выражение для нормирующего множителя k_n , который следует принять равным

$$k_n = \frac{1}{k_M} = \frac{\gamma}{[\sigma]}, \quad (6)$$

что после подстановки в (5) даёт окончательную формулу для искомого силового критерия, выраженную в %:

$$K_F = \frac{\gamma \cdot F_k}{[\sigma] \cdot M_k} \cdot 100\%, \quad (7)$$

где γ — плотность материала крепи, кг/м³;

F_k — рабочее сопротивление (реакция) крепи, кН;

M — масса крепи или её элемента, кг;

$[\sigma]$ — допустимое напряжение материала крепи с учётом характера преобладающих предельных напряжений (на растяжение, сжатие, изгиб), кН/м².

Нетрудно убедиться, что силовой критерий технической эффективности K_F является безразмерным и отвечает требованиям нормировки, т. е. всегда находится в пределах $0 \leq K_F \leq 100 \%$.

Подобного типа критериями можно оценить техническую эффективность крепи или отдельных её элементов в зависимости от времени в разные периоды её эксплуатации.

Важно, помимо частных критериев деформационно-силовых показателей крепей, сопоставить работоспособность всей конструкции в процессе взаимодействия с породным массивом.

Работоспособность крепи отражает ту работу, которая затрачивается горным массивом при нагружении и деформации крепи и может быть определена из выражения

$$W(t) = \int_{U_0}^{U(t)} F_k(\xi, t) \cdot d\xi, \quad (8)$$

где $W(t)$ — работа, затраченная на деформирование конструкции крепи, Нм;

$F_k(\xi, t)$ — переменная во времени нагрузка на крепь со стороны породного массива, в общем случае зависящая и от деформаций контура крепи ξ , кН;

$U(t)$ и U_0 — начальное (при $t = 0$) и конечное ($t > 0$) смещения крепи.

Если $F_k(\xi, t) = Const$, что наблюдается у идеально податливых конструкций, формула (8) значительно упрощается:

$$W(t) = F_k \cdot [U(t) - U_0]. \quad (9)$$

Нетрудно, повторяя предыдущие рассуждения, показать, что НКТЭ для оценки работоспособности крепи можно получить из равенств (4) и (7) путём «свёртки» этих двух взаимно дополняющих друг друга НКТЭ — силового K_F и деформационного K_D критериев:

$$K_W = K_F \cdot K_D = 2 \frac{\gamma \cdot F_k}{[\sigma] \cdot M_k} \cdot \frac{U}{L} \cdot 100\%. \quad (10)$$

Критерии могут получить и иную, более доступную для понимания интерпретацию как своего рода коэффициенты полезного действия по каждому из свойств. Так, силовой критерий K_F показывает, насколько эффективно используются прочностные свойства материала, из которого изготовлена крепь. Деформационный критерий K_D отражает адаптивные возможности крепи при её смещениях по сравнению с идеальной податливостью. И, наконец, критерий работоспособности K_W указывает на КПД (долю возможной работы) конструкции в процессе взаимодействия с породным массивом.

Какими НКТЭ обладают известные типы крепи, можно проследить по данным таблицы 2. Диапазон допустимого изменения каждого из критериев от 0 до 100 %. В таблице крепи ранжированы по степени возрастания результирующего критерия — НКТЭ работоспособности крепи K_W .

Исходные данные для взятых в качестве примера типов крепи были получены из технической и справочной документации. Они в целом хотя и достаточно достоверны, но всё же имеют оценочный характер, и поэтому результаты расчётов по формулам (4), (7) и (10) могут колебаться в пределах $\pm 20 \%$. Более того, при расчётах силового критерия эффективности по формуле (7) рабочее сопротивление крепи либо назначалось согласно её паспортным данным (например, для стоек), либо для рамных конструкций крепи при идеальном их нагружении со стороны массива — равномерно распределённой нагрузкой.

Отметим, что если нагрузка на крепь будет иного распределения, рабочее сопротивление рамной крепи снизится в 5–10 раз, что показано в работе [6].

В таблице 2 (выделены min и max значения) рассчитаны критерии НКТЭ для шахтных стоек разных типов, рамных деревянной и стальной крепи, а также анкера и посадочной крепи «Спутник». Для всех иных конструкций крепи определение их критериев технической эффективности не представляет сложности, и таблица 2 может быть при необходимости дополнена. Более того, на основе разработанного метода представляется возможным оценить эффективность конструкторских решений при проектировании иных строительных сооружений и их элементов (колонны, балки, фундаменты и др.).

Таблица 2
Критерии НКТЭ шахтных крепей

	Название крепи	НКТЭ %		
		K_F	K_D	K_W
1	Рамная крепь из дерева	0,2	13	0,0
2	Стойка дерев. d=24 см	3	13	0,3
3	Рамная стальная крепь	2	25	0,4
4	Посадочная стойка ОКУ06	14	14	2
5	Посадочная крепь «Спутник»-ГУ	4	57	3
6	Стойка стальная из СВП-27	5	67	3
7	Гидростойка 2ГСК-13	11	53	6
8	Гидростойка 2ГВС13	12	53	6
9	Гидростойка 2ГВТ4	25	38	9
10	Анкер d=32	63	20	11
11	Стойка трубчато-желобчатая 9Т25Ж	15	71	11
12	Угловая стойка трения 8Т20У	16	72	12
13	Стойка трения 6Т20	20	80	16
14	Гидростойка (ГСУМ)1	25	81	20
15	Угловая стойка трения 1Т15У	28	71	20

Как видно из таблицы 2, наиболее эффективна по силовому критерию анкерная крепь $K_F = 63\%$, т. к. она достигает более чем половины значения коэффициента конструктивного качества материала, из которого она изготовлена. Ни одна из существующих конструкций крепи не смогла хотя бы наполовину приблизиться к показателю анкера по силовому критерию $K_F = 60–70\%$, оставаясь в пределах 0...25%. Худшими по силовому критерию K_F оказались рамные деревянная и стальная крепи, что обусловлено неравнопрочностью конструкции. Последняя неизбежна из-за низкой грузонесущей способности самого ответственного элемента — верхняка, работающего на продольно-поперечный изгиб.

Деформационные свойства крепей, представленные критерием K_D , различаются столь же разительно: от 10 до 80%. Лучшими деформационными критериями (до 80%) обладают стойки трения и некоторые гидростойки, в которых практически до предела использован возможный запас раздвижности. В разы хуже критерий K_D у крепей с малой конструктивной податливостью — это рамная деревянная крепь (10–15%) и стальная крепь из спецпрофиля (в пределах 25–30%).

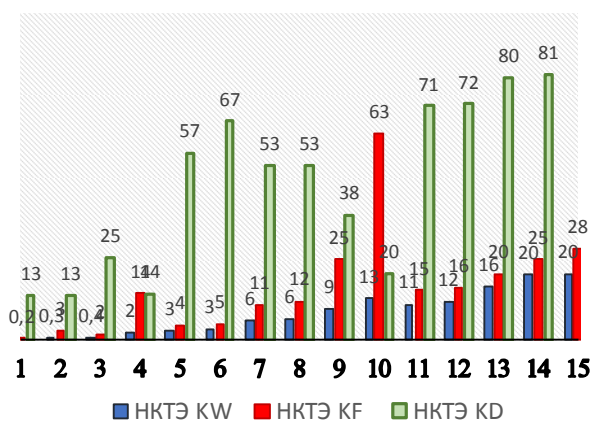


Рисунок 5 Гистограмма НКТЭ
(по оси абсцисс расположены номера типов крепи согласно таблице 2)

Итоговый критерий технической эффективности K_W отражает работоспособность крепи, выраженную в процентах, и не превышает 20 % у стоек (табл. 2, п. 14 и 15). Минимальное значение (доли процента) работоспособности показали существующие рамные стальная и деревянная крепи.

Такие недопустимо низкие значения критериев работоспособности K_W и силовых показателей K_F показывают, что привычные конструктивные решения рамной крепи далеко не в полной мере реализуют деформационно-прочностные показатели материалов, из которых они изготовлены. Основную причину такого несоответствия показателей крепи и крепёжного материала следует усматривать в нерациональном конструктивном их использовании, особенно когда элементы рамной крепи проектируют на изгибающие нагрузки.

В то же время из проведённого анализа следует, что самыми эффективными конструкциями крепи являются податливая стойка трения, работающая на осевое сжатие, и анкер при осевом растяжении. Однако у стойки трения при высоком деформационном критерии ($K_D = 70\text{--}80\%$) оказался низким силовой критерий ($K_F = 15\text{--}20\%$), как показал анализ, из-за несовершенства узлов податливости. У анкера критерии эффективности зеркально антисимметричны: самый высокий силовой критерий эффективности ($K_F = 60\text{--}70\%$) при весьма низком деформационном критерии ($K_D = 20\%$).

Таким образом, имеются большие потенциальные резервы в развитии таких горных крепей — самых распространённых при подземных горных работах. Модернизация этих крепей должна быть направлена на устранение присущих им и количественно оценённых техническими критериями недостатков: для стоек — значительное повышение силового критерия путём создания новых узлов податливости с высоким сопротивлением, а для анкеров — изменение конструкции в направ-

лении существенного повышения податливости.

Сопоставление особенностей работы и соответствующих критериев технической эффективности стоечной и анкерной крепи явно показывает реализацию диалектического закона «отрицание отрицания» [8]. Мы видим переход исходного тезиса (стойка) в антитезис (анкер), и далее должен последовать синтез — появление новой конструкции крепи.

Таким образом, научно обосновывается прогноз эволюции развития конструкций горной крепи как сочетание наиболее удачных показателей стоечной и анкерной конструкций в направлении достижения их высоких деформационно-силовых критериев. Назовём условно такую новую конструкцию крепи стоечно-анкерной, при этом в ней следует избегать элементов, работающих на изгиб, у которых низкие критерии технической эффективности. Отметим и важные выводы, которые следует сделать относительно формы пластовых подготовительных выработок, особенно в зоне вредного влияния очистных работ.

Новый тип стоечно-анкерной крепи потребует отказа, во-первых, от рамных крепей с применением спецпрофиля и, во-вторых, повсеместного перехода от арочной формы выработок к прямоугольной, что резко снизит производственные затраты и повысит безопасность горных работ.

Исследования в этом направлении будут изложены в дальнейших публикациях.

Выводы

Нормированные критерии технической эффективности (НКТЭ) дают научно обоснованную базу для объективного сравнения различных образцов горной техники и крепи в частности, что важно на всех этапах её создания, проектирования, изготовления и эксплуатации.

В частности, в результате выполненных исследований:

1) впервые рассмотрена эволюция развития горной крепи с диалектических позиций;

2) сформулированы требования к горной крепи с позиций особенностей взаимодействия её с массивом горных пород;

3) изучены коэффициенты k_M конструктивного качества материалов крепи;

4) впервые предложены критериальные требования и обоснованы значения нормированных критериев технической эффективности горной крепи (деформационный K_D , силовой K_F и работоспособности K_W);

5) впервые для крепей различных типов рассчитаны НКТЭ и выполнен их сопоставительный анализ;

6) на базе диалектической триады дан научно обоснованный прогноз эволюции развития конструкций горной крепи для подготовительных горных выработок.

Выполненные исследования могут быть положены в основу принятия решений при проектировании крепи и при разработке новых её конструкций с учётом закономерностей проявлений горного давления и взаимодействия крепи с окружающим массивом. Основные выводы будут также полезны при подготовке инженеров и аспирантов горных специальностей.

Библиографический список

1. Каретников, В. Н. Крепление капитальных и подготовительных горных выработок [Текст] : справочник / В. Н. Каретников, В. П. Клейменов, А. Г. Нурдихин. — М. : Недра, 1989. — 571 с.
2. Jovanovic, P. Projektovanje i proračun podgrade horizontalnih podzemnih prostorija / Petar Jovanovic // Rudarsko-geoloski fakultet Univerziteta u Beogradu. (Rudarstvo). — 1994. — Kn. 1, 2, 3. — 518 s.
3. Баклашов, И. В. Механика подземных сооружений и конструкции крепей [Текст] : учебник для вузов / И. В. Баклашов, Б. А. Картозия. — [3-е изд., стер.]. — М. : Студент, 2012. — 543 с.
4. Tajduś, A. Geomechanika w budownictwie podziemnym. Projectowanie i budowa tuneli [Text] / Antoni Tajduś, Marek Gała, Krzysztof Tajduś. — Krakow : Akademia AGH, 2012. — 762 s.
5. Литвинский, Г. Г. Стальная крепь горных выработок [Текст] / Г. Г. Литвинский. — Киев : Техника, 1999. — 216 с.
6. Литвинский, Г. Г. Горное давление на малых и больших глубинах разработки [Текст] / Г. Г. Литвинский // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2012. — № 37. — С. 5–19.
7. Литвинский, Г. Г. Критерии оценки технического уровня горной техники [Текст] / Г. Г. Литвинский // Уголь Украины. — 2015. — № 9. — С. 41–46.
8. Гегель, Г. В. Ф. Наука логики. В 3-х томах / Г. В. Ф. Гегель. — М. : Мысль, 1972. — 371 с.

© Литвинский Г. Г.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СПСиШ ДонНТУ Борщевским С. В., к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТУ Мележиком А. И.

Статья поступила в редакцию 26.09.19.

проф. Литвинський Г. Г. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР, ligag@ya.ru)

ГІРСЬКЕ КРІПЛЕННЯ: ЕВОЛЮЦІЯ РОЗВИТКУ І КРИТЕРІЙ ТЕХНІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Дано стислий аналіз існуючих конструкцій гірського кріплення. Показано діалектику його еволюції і простежено тенденції розвитку. Сформульовано основні технічні вимоги до деформаційно-силових показників кріплення. Обґрунтовано нормовані критерії його ефективності та працездатності. Проведено чисельне порівняння ефективності різного кріплення, виконано аналіз і прогноз еволюції його розвитку.

Ключові слова: гірнична виробка, гірниче кріплення, діалектика еволюції кріплення, вимоги до кріплення; деформаційно-силові показники; коефіцієнт якості матеріалу кріплення; критерії ефективності та працездатності, порівняння кріплення, прогноз розвитку.

Prof. Litvinsky G. G. (*DonSTU, Alchevsk, LPR, ligag@ya.ru*)

MINE SUPPORT: EVOLUTION OF DEVELOPMENT AND CRITERIA OF TECHNICAL EFFICIENCY

A brief analysis of the existing mine support structures is given. The dialectic of its evolution is shown and development trends are traced. The basic technical requirements for the deformation-force indicators of mine support are formulated. The normalized criteria for its effectiveness and efficiency are proved. A numerical comparison of the effectiveness of different linings was carried out, an analysis and forecast of their evolution was done.

Key words: *excavation, mine support, dialectic of lining evolution, requirements to lining; deformation-force indicators; quality factor of lining material; criteria of effectiveness and efficiency, comparison of linings, prediction of development.*