

УДК 622.28

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

ШАХТНАЯ ТРУБОБЕТОННАЯ СТОЙКА (СТБ)

Дан аналитико-исторический обзор существующих конструкций шахтных стоек как основного элемента крепи горных выработок. Выявлены основные особенности конструкции и недостатки шахтных стоек. Сформулированы основные технические требования при их конструировании. Предложена новая конструкция податливой шахтной стойки из трубобетона. Приведены главные технико-экономические показатели новой шахтной стойки и целесообразная область её применения.

Ключевые слова: подготовительные выработки, крепление, шахтная стойка, трубобетон, критерии эффективности, узел податливости, работоспособность, предварительный распор, параметры стойки.

1 Актуальность и цель исследований

Шахтные стойки при ведении подземных работ появились ещё в доисторические времена и уже с V–IV тысячелетия до нашей эры стали простейшей и самой доступной конструкцией крепи, они положили начало и стали базой для развития этого направления горной техники и технологии. Исторически появление стойки как элемента крепи было обусловлено стремлением к защите подземных рабочих от вывалов породы с кровли горных выработок. Хотя несущая способность таких стоек была весьма ограниченной, их использование при сооружении горных выработок быстро расширялось по мере увеличения глубины ведения горных работ и усложнения горно-геологических условий. Позже для повышения безопасности стойки стали устанавливать под горизонтальную поперечину (верхняк).

Уже в капитальном энциклопедическом труде Георгия Агриколы [1] приведено описание крепления подземных выработок с упоминанием деревянных стоек как несущих элементов крепи (рис. 1). Только в середине XIX века после развития металлургии и начала производства металлопроката в Чехии и Германии впервые появляются стальные рамные крепи из двутавра и рельса.

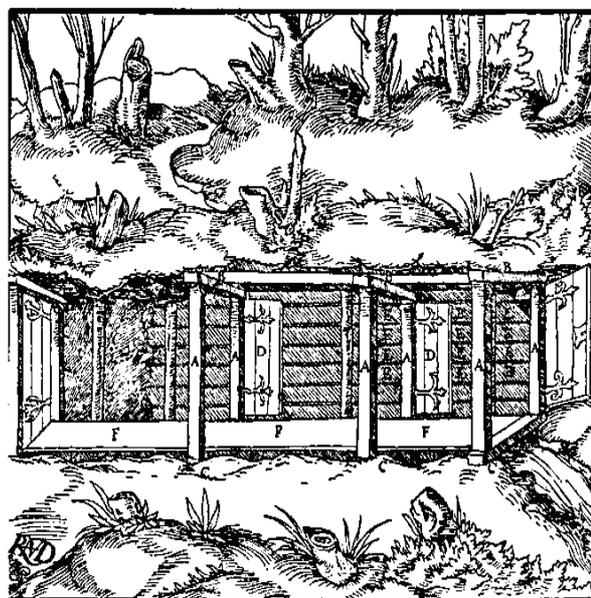


Рисунок 1 Иллюстрация крепления подземных выработок в средние века [1], где А — деревянные стойки в штольне

В стальные рамы начали вводить шарниры, благодаря чему крепи получили массовое применение на угольных шахтах Англии и Германии. В 1932 г. в фирме «Тессен-Хейнцман» разработали парные желобчатые профили и податливое соединение стоек и верхняков, после чего начала массово применяться податливая крепь [2]. В Донбассе стальную крепь начали использовать в подготовительных выработках с 1937 г., раздвижные стойки конст-

рукции ВУГИ внедрялись в лавах с 1939 г., а в 1940 г. для крепления кровли лав уже в 213 очистных забоях Донбасса применялись стальные стойки [3, 4].

В институте ДонУГИ в начале 1950-х гг. были разработаны прокатный профиль СВП и отечественные конструкции металлической рамной крепи. В 1955 г. ею было закреплено 27 % всех протяжённых выработок, а в настоящее время — более 90 %. В податливых крепях основную роль выполняет узел податливости, который устанавливают на стыке верхняка и стойки крепи. Разработки различных модификаций стальной крепи и основных её элементов (узлов податливости, затяжки, межрамных стяжек и др.) были отражены в десятках изобретений и проектных разработок [2]. Уже к 40-м годам прошлого столетия было предложено около полусотни конструкций металлических раздвижных стоек крепи, которые воспринимали давление пород за счёт сопротивления сил трения в замковых частях. К настоящему времени число патентов на стойки превысило сотню.

Такое многообразие конструкций наглядно свидетельствует об отсутствии общепринятой идеи, воплощённой в оптимальное устройство, что вызывало непрекращающийся конструкторский поиск, который продолжается донныне.

Несмотря на многочисленные предложения и разработки по совершенствованию крепи, главный вектор инерции мышления в этой области, заданный около века назад немецкими проектами специального корытного профиля проката для крепи, оказался непреодоленным.

Это свидетельствует о том, что проблема разработки новых конструкций крепи для подготовительных горных выработок остаётся актуальной для горной промышленности. И в первую очередь следует обратить внимание на разработку основного несущего элемента крепи — стойки. Шахтные стойки как исторически исходная конструкция могут быть использованы не

только в рамной крепи подготовительных горных выработок, но и как индивидуальная крепь очистных забоев [5, 6], а также как крепь усиления для поддержания, охраны подготовительных горных выработок в зонах временного и неустановившегося опорного давления вблизи лавы.

Целью исследования является разработка требований, критериев эффективности и новой конструкции шахтной стойки универсального применения.

Идея работы состоит в создании новой конструкции раздвижной шахтной стойки, снабжённой усиленным узлом податливости и распорным устройством, с использованием преимуществ трубобетона, прогрессивного в строительстве.

Объектом исследования являются шахтные стойки и их технико-экономические показатели, **предмет** исследований — закономерности взаимодействия и параметры конструктивных элементов новой стойки в режиме податливости.

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

- 1) сравнение различных типов стоек на основе предложенных критериев их технической эффективности;
- 2) анализ типов пригодных для изготовления стоек открытых и замкнутых прокатных профилей с позиций жёсткости и устойчивости;
- 3) предложение новой конструкции телескопической податливой шахтной стойки на основе сформулированных требований;
- 4) разработка математической модели расчёта нового узла податливости для шахтной стойки;
- 5) оценка эффективности предложенной стойки и области возможного её применения.

Несмотря на достаточно узкую область выбранных исследований, решение поставленных задач позволит систематизировать, упорядочить и провести сравнительную оценку существующих и разработать новые конструкции шахтных телескопических податливых стоек.

2 Обоснование основных требований к шахтным стойкам

Среди всех крепей следует выделить две базовых конструкции: стойку и анкер. Они расположены с противоположных концов вектора исторического развития конструкций шахтной крепи, а именно — в его начале и в конце. Их объединяют такие сходные качества:

1) оптимальная работа лишь под действием осевой нормальной силы (для стойки — сжатие, для анкера — растяжение);

2) возникновение изгибающих моментов или поперечных сил является крайне нежелательным;

3) нуждаются в создании предварительного распора (преднапряжения) при установке;

4) податливый режим работы при взаимодействии с массивом пород;

5) точечное взаимодействие с породным контуром горной выработки, поэтому для предотвращения вывалов породы на соседних с крепью участках обе конструкции нуждаются в ограждении породного контура (затяжке).

Однако имеются и значительные отличия стойки и анкера:

1) если стойка предназначена для восприятия сжимающей нормальной силы, 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, размещён в окружающем выработку 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 её устойчивости, тогда как у анкера этот эксцентриситет при увеличении нагрузки уменьшается и не опасен;

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».

Обратим внимание на то, что горные специалисты в последнее время усиленно совершенствовали анкерную крепь, и она получила значительное развитие, пройдя путь от клиновых до вклеенных в породный массив конструкций. Однако шахтные стойки до сих пор сохранили традиционные решения, и наблюдается определённый застой в их развитии.

Область применения шахтных стоек весьма обширна: их используют как временные и постоянные элементы крепи при сооружении капитальных и подготовительных горных выработок, в очистных выработках и на сопряжениях лавы. Этим обусловлен такой спрос на различные типы шахтных стоек.

Эти стойки вначале изготавливались в виде деревянных опор, а затем — как элемент рамной крепи (рис. 1, 2). Деревянные стойки воспринимали нагрузку от верхняка, который должен был противостоять весу разрушенных пород в кровле горной выработки. Таким образом, деревянная рама обладала достаточно жёсткими деформационно-силовыми характеристиками, обусловленными отсутствием податливости у стоек, что заставляло её работать в режиме заданных нагрузок (вес вывалов, свода естественного обрушения и пр.). Даже попытки придать стойкам некоторую податливость путём затачивания их нижних концов «под карандаш» не могли спасти положение. При этом грузонесущая способность стоек оказывалась на порядок (в 10...15 раз) выше, чем у верхняка, рабо-

тающего на изгиб. Следовательно, крепь оказывалась крайне неравнопрочной. Повторное использование деревянных стоек было весьма затруднительным, что ограничивало их применение для крепления очистных выработок.

С целью устранения этих недостатков значительно позже были разработаны металлические клиновые (рис. 3) и гидравлические конструкции стоек, которые при ведении очистных работ получили большое распространение как индивидуальная металлическая крепь [5]. Для этого был разработан параметрический ряд металлических призабойных стоек, которым предусматривалось изготовление 28 моделей стоек трения постоянного сопротивления и 10 моделей гидростоек с замкнутой гидросистемой [6].

Податливость клиновых стоек создаётся за счёт сил трения, возникающих в замке при скольжении выдвинутой части стойки относительно неподвижной. Много усилий было потрачено на разработку узлов податливости стоек трения и к настоящему времени предложено несколько десятков работоспособных конструкций. Их минусами являются недостаточное трение в замках податливости, которое зависит от неконтролируемого усилия забивки клина, и невозможность первоначального распора между кровлей и почвой без дополнительных механизмов. Однако эти стойки обладают значительной раздвижностью и поэтому удобны для перестановок и повторного использования. Кроме того, при высоких усилиях расклинивания узла податливости такие стойки при сравнительно небольшом весе имеют высокий критерий технической эффективности, достигающий до 70...80 % [7]. Рабочее сопротивление стоек находится в пределах 150...300 кН.

Гидравлические телескопические стойки (рис. 4) во многом схожи, но в отличие от стоек трения имеют меньшую трудоёмкость установки, быструю разгрузку от давления и обладают предварительным распором. Гидростойки обеспечивают

предварительный распор и постоянное сопротивление при нагрузке от 150 до 300 кН, их легко устанавливать и выводить из-под нагрузки. Однако этой разновидности стоек присущи высокая стоимость изготовления и эксплуатации, они более сложны по конструкции.

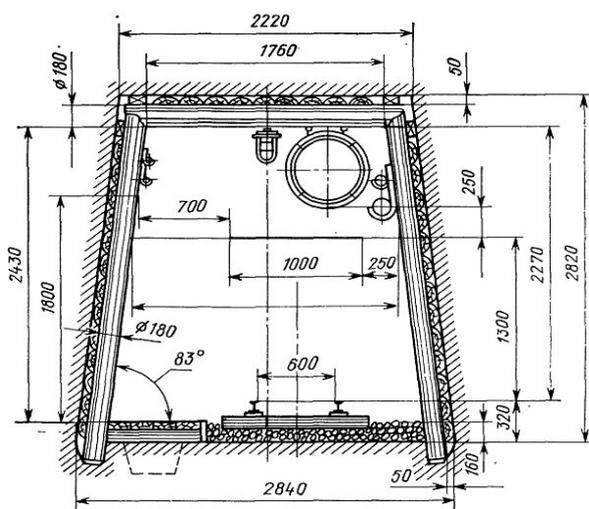


Рисунок 2 Деревянная рамная крепь в виде двух стоек под верхняк



Рисунок 3 Индивидуальная механическая стойка трения STV (СТВ)



Рисунок 4 Стойки гидравлические СУГ-М, ГВП и ГВПУ (Точмаш, ОАО)

Опираясь на рекомендации работы [7], для проведения сравнительной оценки технического уровня рассмотрим основные требования, которым должны отвечать шахтные стойки. Эти требования целесообразно сформулировать главным образом на основе особенностей функционального использования стоек в качестве самостоятельного или конструктивного элемента крепи. А такое использование предполагает в первую очередь контактное взаимодействие стойки с массивом горных пород, что предопределяет наиболее важные требования к ним из условий деформационно-силового взаимодействия с массивом горных пород.

Силовое взаимодействие с породным массивом предполагает следующие требования:

- высокую грузонесущую способность;
- рабочее сопротивление конструкции должно быть близким к предельной несущей способности крепи — не ниже 80 %;
- возможность предварительного распора и обеспечение его максимального значения;
- минимизация концентрации напряжений на участке контакта крепи, например концов стойки, с массивом горных пород;
- быстрый набор рабочего сопротивления при нагрузке со стороны пород;
- простая и удобная разгрузка крепи от внешнего давления при её извлечении;

– возможность контроля усилий на контакте «крепь–массив» и управления ими.

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

- обеспечивать максимально возможную раздвижность при установке, чтобы обеспечить нужный запас податливости;
- иметь плавную, без рывков и ударов податливость под действием нагрузки, превышающей уровень рабочего сопротивления;
- при исчерпании запаса податливости перейти в жёсткий режим работы с предельным усилием отпора;
- сохранять продольную устойчивость сжатых элементов (стоек, стен) под нагрузкой;

– не деформировать (сминать или раздавливать) породы на контакте с опорами.

Сформулированные требования относятся лишь к деформационно-силовым характеристикам стоек, которые отражают эксплуатационно-функциональные особенности их работы при взаимодействии с породным массивом. Они нуждаются в дополнении технико-экономическими показателями для полноты рассмотрения и достоверного суждения при сравнении и выборе возможных конструкций крепи.

Для сравнительной оценки различных крепей нами предложен ряд нормированных технических критериев эффективности [7]:

– деформационный критерий:

$$K_D = 2 \frac{U}{L} \cdot 100\%; \quad (1)$$

– силовой критерий:

$$K_F = \frac{\gamma \cdot F_k}{[\sigma] \cdot M_k} \cdot 100\%; \quad (2)$$

– критерий работоспособности:

$$K_W = K_F \cdot K_D = 2 \frac{\gamma \cdot F_k}{[\sigma] \cdot M_k} \cdot \frac{U}{L} \cdot 100\%, \quad (3)$$

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;

γ — плотность материала крепи, кг/м³;

$[\sigma]$ — предел прочности материала крепи на один из видов нормативных нагрузок (одноосное сжатие или растяжение, изгиб и др.), действующих на крепь, кПа;

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

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

В таблице 1 приведены вычисленные по формулам (1–3) НКТЭ для различного типа шахтных стоек.

Из данных таблицы 1 следует, что все стойки без конструктивных элементов податливости (позиции 1, 2) по критерию работоспособности на порядок уступают шахтным стойкам, обладающим конструктивной раздвижностью. Однако и у этих стоек НКТЭ работоспособности составляет всего лишь порядка 10 % от теоретически возможных 100 %.

Таблица 1

Критерии НКТЭ шахтных стоек

№ п/п	Название крепи	НКТЭ %		
		КФ	КД	КВ
1	Стойка дерев. d=24 см	8	7	3
2	Стойка стальная из СВП-27	1	67	1
3	Гидростойка 2ГСК-13	19	53	10
4	Гидростойка 2ГВС13	21	53	11
5	Гидростойка 2ГВТ4	25	38	9
6	Стойка трубчато-желобчатая 9Т25Ж	17	71	12
7	Уголковая стойка трения 8Т20У	16	72	12
8	Стойка трения 6Т20	17	80	13
9	Гидростойка (ГСУМ)1	16	81	13
10	Уголковая стойка трения 1Т15У	12	71	9

Следовательно, надо признать, что, во-первых, применения стоек с жёсткой деформационно-силовой характеристикой следует всемерно избегать, и, во-вторых, даже лучшие конструкции шахтных стоек с высокой податливостью имеют большой резерв совершенствования.

В первую очередь главным направлением повышения работоспособности шахтных стоек, исходя из анализа данных таблицы 1, является улучшение их силового критерия, что требует пересмотра привычных приёмов и шаблонов их конструирования. Особенно это касается узлов податливости, рабочее сопротивление которых намного ниже несущей способности главных элементов стоек.

3 Разработка новой конструкции трубобетонной стойки

Неизменным атрибутом стальной крепи подготовительных горных выработок остаётся корытный профиль и податливое соединение между основными несущими элементами — стойками и верхняком. Следствием такой, чаще всего неосознанной, инерционной «традиции» в технике становится целый набор недостатков, присущий этому типу крепления, главными из которых являются:

– использование корытообразного прокатного профиля для основных силовых элементов — верхняка и стоек, легко теряющего местную и общую устойчивость при нагрузке;

– работа элементов крепи главным образом на изгиб, что ведёт к высокой неравномерности распределения усилий между ними;

– низкое рабочее сопротивление существующих узлов податливости, их неравномерная работа и низкая надёжность.

На преодоление этих недостатков и были направлены основные конструкторские разработки для стальных рамных крепей.

При рассмотрении индивидуальных стоек с самого начала исключим из возможных прототипов новой конструкции известные типы гидростоек из-за их высокой стоимости, сложности ремонта и об-

служивания. Ограничимся рассмотрением не менее работоспособных и обладающих высокими НКТЭ стоек трения.

При этом, исходя из ранее сформулированных требований к деформационно-силовым характеристикам, отметим наиболее существенные недостатки этих стоек:

- сложные конструкции клиновых узлов податливости, что существенно повышает стоимость изготовления и ремонта;

- существующие узлы податливости заметно (в разы) снижают грузонесущую характеристику стойки;

- ограничение работоспособности стоек из-за возможной потери общей (по Эйлеру) и местной устойчивости тонкостенных элементов.

Для достижения поставленной цели максимального увеличения рабочего сопротивления стойки полезно уяснить, что главной причиной его низкого значения является недостаточно высокое сопротивление узла податливости. В качестве базовой примем основную идею осуществления податливости за счёт преодоления сил трения между выдвижной (штоком) и неподвижной (корпусом) частями стойки.

Нагрузка, которую может воспринять шахтная стойка, определяется величиной силы трения между корпусом стойки и её выдвижной частью. Чтобы обеспечить нужную величину сил трения, их создают различным образом: установкой между выдвижной частью и корпусом особых прокладок с высоким коэффициентом трения, приданием волнистости или шероховатости контактной поверхности между корпусом и выдвижной частью и пр.

Особенно большие усилия конструкторов были затрачены на разработку узлов податливости в виде зажимных устройств-замков, предназначенных для создания и регулирования силы сопротивления опусканию штока стойки.

Поскольку силы трения линейно зависят от числа поверхностей трения и величины усилий их прижатия, именно эти особенности и следует положить в основу

новой стойки трения. При этом необходимо, чтобы в новой конструкции:

- поперечный профиль стойки был выполнен из стандартных круглых труб;

- был бы простой и надёжный узел предварительного распора;

- податливость стойки была не менее её максимальной раздвижности;

- было увеличенное число поверхностей трения для обеспечения наибольшего сопротивления податливости;

- удобно осуществлялись быстрый монтаж и демонтаж;

- имелась возможность многократного повторного использования.

С учётом сделанных замечаний и сформулированных требований была разработана конструкция новой стойки трения.

Стойка КСТ по конструкции относится к раздвижным податливым стойкам, работающим по принципу трения, а по рабочей характеристике — к стойкам постоянного сопротивления.

Стойка КСТ (рис. 5) состоит из корпуса 1, штока (выдвижной части) 2 и узла податливости (замка).

Корпус 1 стойки изготовлен из трубного профиля. Верхняя часть корпуса 1 снабжена продольными прорезями 2, на которые установлен замок (узел податливости) в виде обоймы 3 с резьбовыми отверстиями, куда ввинчены силовые болты 4. Нижняя часть корпуса снабжена внутренней резьбой 5, на которую ввинчена трубная втулка 6, приваренная к нижней опоре 7. На ней предусмотрены отверстия 8 для создания предварительного распора стойки между кровлей и почвой при установке путём вращения опоры 7 посредством рычага (не показан). В корпус 1 вставлен шток 9 как выдвижная часть стойки в виде трубы. Труба штока снабжена приваренным днищем 10 и заполнена бетоном 11.

Таким образом, используется не пустая труба, а трубобетон, что даёт значительные преимущества при обеспечении жёсткости и несущей способности. На верхний конец штока 9 установлена опора 12.

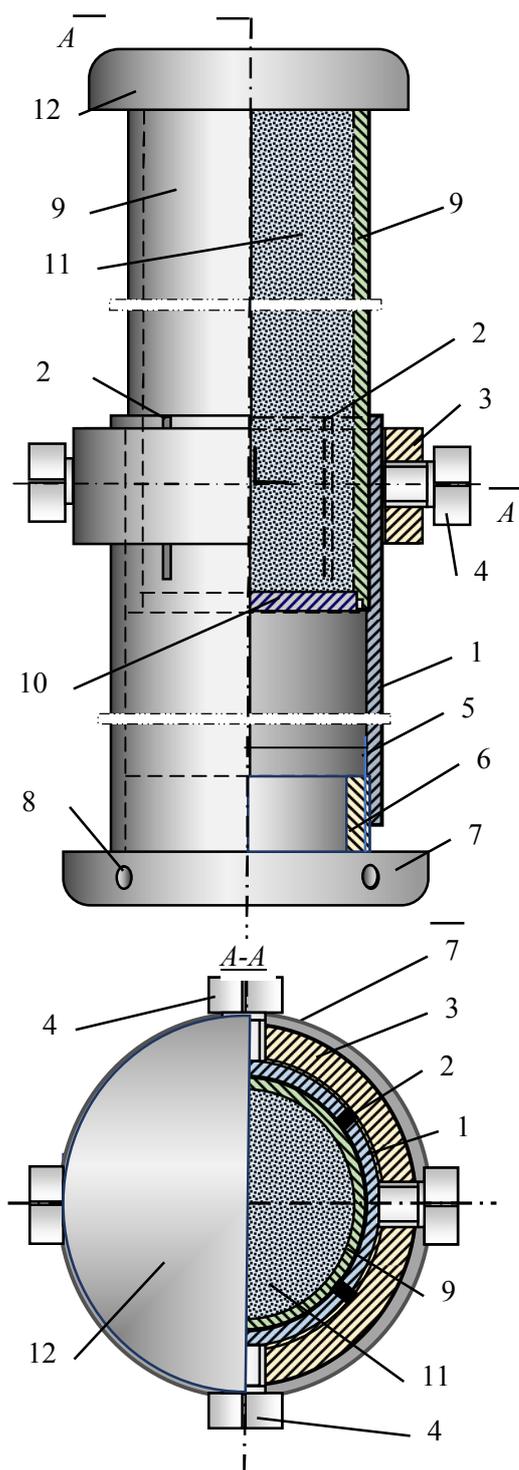


Рисунок 5 Конструкция трубобетонной стойки трения постоянного сопротивления (СТБ)

Принцип работы стойки следующий. Стойку доставляют в подготовительную выработку в полностью собранном виде с узлом податливости, силовые болты 4 ко-

торого с заданным усилием расперты между обоймой 3 и верхней частью корпуса с прорезями 2. Тем самым создаются радиальные силы, зажимающие шток 9 в верхней части корпуса 1. Стойку устанавливают по нормали между кровлей и почвой, затем производят её предварительный распор путём вращения нижней опоры 7 с помощью рычага, вставленного в отверстия 8.

При нагрузке на стойку со стороны пород шток 9 удерживается силами трения, возникающими в результате зажатия верхней части трубы корпуса 1 симметрично размещёнными силовыми болтами 4, взаимодействующими с обоймой 3. Пока нагрузка на стойку не превышает её рабочее сопротивление, заданное силовыми болтами 4, стойка работает в упругом режиме. Как только нагрузка окажется равной рабочему сопротивлению стойки, начинается её работа в податливом режиме путём проскальзывания штока 9 относительно верхней части корпуса 1 в узле податливости с преодолением сил сопротивления трения. Деформирование стойки происходит при постоянном рабочем сопротивлении на всём пути запаса податливости, длина которого может достигать почти половины высоты стойки.

Новый узел податливости, благодаря своему конструктивному решению в виде обоймы 3 с зажимными болтами 4, обеспечивает непосредственную передачу нагрузки за счёт сил трения от штока 9 на корпус 1. В процессе проскальзывания штока 9 относительно верхней части корпуса 1 сохраняется неизменным распределение нормальных и касательных усилий на всём пути перемещения штока 9 по корпусу 1. Поэтому перекосы, рывки и неравномерности в работе стойки отсутствуют.

Поскольку шток выполнен как трубобетонная конструкция, достигается возможность существенного повышения несущей способности штока за счёт совместной работы стальной трубы и бетона в ней [8]. В частности, предельное усилие сжатия трубобетона увеличивается в 2–3 раза, глав-

ным образом за счёт повышения сопротивления потере продольной (по Эйлеру) и местной (изгиб стенки) устойчивости.

Кроме того, чтобы преодолеть главный недостаток существующих узлов податливости, связанный с невозможностью повышения сжимающих усилий от ботов 4 на шток 9 из-за деформации трубы, шток заполняется бетоном и болты 4 располагаются симметрично, что позволяет повысить сопротивление трубы их вдавливанию и полностью использовать усилие давления болтов.

Прорези 2 в верхней части корпуса 1 длиной 1,2..1,3 высоты обоймы 3 обеспечивают нестеснённое радиальное смещение образованных частей трубы корпуса при их сжатии болтами 4 узла податливости, что исключает снижение усилий обжатия штока 9 лепестками трубы корпуса.

Устройство предварительного распора стойки в виде приваренной к нижней опоре 7 трубной втулки 6 с внешней резьбой, которая вкручена в резьбу нижней части корпуса 1, обладает предельной простотой конструкции и позволяет не только регулировать длину стойки при её установке, но и создать предварительный распор, близкий к рабочему сопротивлению стойки.

Стойки устанавливают под металлические верхняки, деревянные распилы или штрипсы с затяжкой перпендикулярно плоскостям напластования, для чего они снабжаются соответствующими верхними опорами. Нижнюю опору стойки помещают на почву, очищенную от земника, кусков угля и породы.

4 Деформационно-силовые параметры трубобетонной стойки

Определим базовые параметры трубобетонной стойки, которые отражают особенности её конструкции: новый узел податливости, устройство предварительного распора и несущую способность труб корпуса и штока.

Согласно расчётной схеме действующих радиальных усилий от болтов 4 в кон-

струкции предлагаемого узла податливости (рис. 6), при движении штока относительно корпуса возникнут четыре силы трения F , которые создают рабочее сопротивление стойки N_C :

$$N_C = 4 \cdot f \cdot F, \quad (4)$$

где f — коэффициент сухого трения стали по стали, $f \approx 0,3$.

Для расчёта стойки следует задаться диаметром трубы корпуса D_k и определить требуемую её толщину δ_k исходя из условия работы корпуса 1 на сжатие:

$$\delta_k = k_1 \cdot N_C / (\pi \cdot D_k \cdot \sigma_t), \quad (5)$$

где k_1 — коэффициент запаса, учитывающий возможные отклонения от расчётной схемы, продольную гибкость трубы и её стенок, $k_1 > 1$;

σ_t — предел текучести стали, кПа.

Диаметр D_S штока 1 принимаем из условия его свободного прохождения в корпусе стойки с зазором $\delta_Z \approx 1...3$ мм:

$$D_S = D_k - 2(\delta_k + \delta_Z). \quad (6)$$

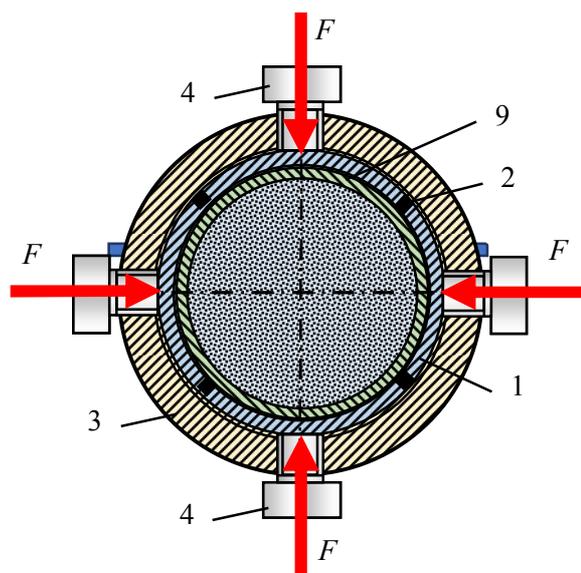


Рисунок 6 Расчётная схема усилий в узле податливости трубобетонной стойки трения

Толщину стенки δ_S штока находим по формуле, аналогичной (4), но с учётом несущей способности бетона на стеснённое сжатие R_6 внутри трубы штока с внутренним диаметром, равным $D_S - 2\delta_S$ из уравнения

$$k_2 \cdot N_C - \pi[D_S \cdot \delta_S \cdot \sigma_t + 0,25R_6 \cdot (D_S - 2\delta_S)^2] = 0. \quad (7)$$

Это нелинейное уравнение можно решить в блоке Solve пакета Mathcad или путём последовательных приближений.

Выбор параметров раздвижности стойки и соотношения длин корпуса и стойки производят исходя из конкретных горно-геологических условий. Так, например, при максимальной длине стойки 2,5 м и ожидаемых смещениях кровли выработки в пределах от 200 до 1000 мм целесообразно длину трубы корпуса принять равной 1,2 м, а длину штока — 1,5 м, чтобы обеспечить раздвижность стойки не менее 1000 мм.

Оценим рабочее сопротивление стойки, если её узел податливости будет снабжён болтами M24 класса 8 с шагом резьбы $h=2$ мм, несущая способность которых равна 340 кН. Тогда, подставляя эти исходные данные в формулу (4), получим:

$$N_C = 4 \cdot 0,3 \cdot 340 = 408 \text{ кН}. \quad (8)$$

Определим силу, которую надо приложить в конце затяжки каждого из болтов для создания необходимого усилия F_3 , для чего воспользуемся принципом возможных перемещений: при обороте болта на 2π радиан он передвинется вдоль оси на величину шага резьбы $h=2$ мм. Принимая длину плеча при затяжке болта $L_3=0,4$ м, получим исходное уравнение из равенства работ

$$2\pi \cdot F_3 L_3 = N_C \cdot h, \quad (9)$$

что после подстановки данных даст

$$F_3 = N_C \cdot h / 2\pi \cdot L_3 = 408 \cdot 0,002 / 2\pi \cdot 0,4 = 0,32 \text{ кН}. \quad (10)$$

Таким образом, силы $F_3=32$ кгс на рукоятке ключа оказываются вполне достаточно.

Определим возможность создания предварительного распора стойки, если считать, что он будет выполняться рычагом длиной $L_r=1$ м при шаге резьбы на трубной втулке, равном $h=4$ мм. Тогда, исходя из принципа возможных перемещений, к рычагу следует приложить усилие

$$F_3 = N_C \cdot h_r / 2\pi \cdot L_r = 408 \cdot 0,004 / 2\pi \cdot 1 = 0,26 \text{ кН}. \quad (11)$$

Следовательно, для предварительного распора стойки при её установке необходимо приложить к рычагу, вставленному в отверстие 8 нижней плиты 7, всего 26 кгс. Тем самым, стойка уже в момент монтажа будет обладать предварительным распором, равным расчётному рабочему сопротивлению, что наиболее эффективно с позиции управления горным давлением.

Используя полученные данные для новой стойки, можно определить показатели её технико-экономической эффективности согласно формулам (1–3):

– деформационный показатель:

$$K_D = 2 \frac{U}{L} \cdot 100\% = 2 \frac{1,0}{2,5} \cdot 100\% = 80\%;$$

– силовой показатель:

$$K_F = \frac{\gamma \cdot N_C}{[\sigma] \cdot M_C} \cdot 100\% = \frac{7,8 \cdot 40,8}{23,5 \cdot 10^3 \cdot 0,04} \cdot 100\% = 34\%;$$

– показатель работоспособности:

$$K_W = K_F \cdot K_D = 80 \cdot 35 / 100 = 28\%,$$

где $U=1,0$ м — конструктивная податливость крепи;

$L=2,5$ м — длина стойки;

$\gamma=7,8$ — плотность стали, т/м³;

$[\sigma]=23500$ — расчётное сопротивление проката из стали С235, т/м²;

$N_C = 40,8$ — рабочее сопротивление стойки, т;

$M_C = 0,04$ — масса стойки, т.

Сравнивая полученные показатели технической эффективности новой трубобетонной стойки трения с соответствующими показателями (табл. 1) существующих стоек трения и гидравлических стоек, можно видеть её очевидное преимущество по силовому критерию и показателю работоспособности в 2 и более раза ($K_F = 34 \% > 20...25 \%$, $K_W = 28 \% \gg 13 \%$).

Это доказывает перспективность использования предложенной стойки взамен существующих. Наиболее весомые преимущества этой шахтной стойки:

- предельная простота конструкции и возможность изготовления из стандартных деталей и труб;

- возможность многократного повторного использования с заранее предусмотренным замком и его рабочим сопротивлением;

- малая масса и размеры, что заметно снижает трудоёмкость и длительность процесса крепления;

- благодаря устройству предварительного распора упрощается монтаж-демонтаж стойки, она сразу выходит на податливый режим с предельным постоянным рабочим сопротивлением;

- трубобетон, из которого выполнен шток, позволяет придать ему высокую жёсткость сопротивления продольному изгибу, а также противостоять смятию под действием сжимающих нагрузок от силовых болтов;

- простота устройства узла податливости (замка) способствует высокой надёжности его работы на всех этапах деформирования пород;

- разные сменные конструкции верхней и нижней опор стойки дают возможность учесть всё многообразие горно-геологических условий её работы (прочность пород, угол падения, контактные неровности, различные комбинации с другими типами крепи и т. д.);

- широкая область применения для крепления, поддержания и охраны подготовительных горных выработок, пройденных по простиранию или падению пластов.

Принимая во внимание давно назревшую потребность в смене научных парадигм в области управления горным давлением и устойчивостью подземных выработок, следует прогнозировать переход от устоявшихся догм к более прогрессивному решению назревших проблем (форма выработки, новые типы и конструкции крепи, способы охраны и поддержания и пр.). Этому будут посвящены дальнейшие исследования и вытекающие из них публикации. В частности, обоснованию необходимости отказа от доминирующих ныне морально устаревших и низкоэффективных арочных рамных крепей из профиля СВП, перехода к прямоугольным или полигональным формам горных выработок с использованием стоечно-анкерных комбинированных конструкций крепи.

Выводы

Проведённые исследования являются логическим продолжением предыдущих научных результатов, а их научная новизна и практическая ценность состоят в следующем:

1. Аналитически-историческим обзором существующих конструкций рамной крепи и шахтных стоек в частности были выявлены их основные недостатки и показана необходимость их замены на более прогрессивные типы.

2. Разработана и исследована новая конструкция шахтной трубобетонной стойки (СТБ) с узлом податливости трения высокого постоянного сопротивления (400 кН) и компактным устройством предварительного распора стойки до уровня её рабочего сопротивления.

3. Новая стойка обладает наиболее высокими деформационно-силовыми показателями технической эффективности и может служить базовой конструкцией при разработке комбинированной стоечно-анкерной крепи горных выработок.

4. Задачи дальнейших исследований состоят в проведении лабораторных, производственных и шахтных испытаний, выпуске опытно-промышленной партии стоек, разработке их параметрического ряда и ТУ по изготовлению и применению с последующим авторским сопровождением промышленного внедрения стоек СТБ и комбинированной стоечно-анкерной крепи в подготовительных горных выработках различного назначения.

Библиографический список

1. Агрикола, Г. О горном деле и металлургии в двенадцати книгах [Текст] / Г. Агрикола ; под ред. С. В. Шухардина. — [2-е изд.]. — М. : Недра, 1986. — 294 с.
2. Литвинский, Г. Г. Стальные рамные крепи горных выработок [Текст] / Г. Г. Литвинский, Г. И. Гайко, Н. И. Кулдыркаев. — К. : Техника, 1999. — 216 с.
3. Зворыкин, А. А. История горной техники [Текст] / А. А. Зворыкин. — М. : Углетехиздат, 1940. — 203 с.
4. Пашкевич, Н. В. История горного дела. Развитие технологии и техники подземной добычи угля [Текст] / Н. В. Пашкевич. — СПб. : СПГГИ(ТУ), 1999. — 132 с.
5. Давидянц, В. Т. Управление кровлей полным обрушением [Текст] / В. Т. Давидянц. — М. : Углетехиздат, 1957. — 184 с.
6. КД 12.01.01.503–2001. Управление кровлей в очистных забоях на угольных пластах с углом падения до 35° [Текст] : руководство. — К. : Минтопэнерго, ДонУГИ, 2002. — 142 с.
7. Литвинский, Г. Г. Горная крепь — эволюция развития и критерии технической эффективности [Текст] / Г. Г. Литвинский // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019. — № 58. — С. 5–19.
8. Литвинский, Г. Г. Теория расчёта центрально сжатых трубобетонных конструкций стоечной крепи [Текст] / Г. Г. Литвинский, Э. В. Фесенко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2012. — № 38. — С. 10–16.

© 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 20.11.19.

д.т.н. Литвинський Г. Г. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ШАХТНИЙ ТРУБОБЕТОННИЙ СТОЯК (СТБ)

Дано аналітико-історичний огляд існуючих конструкцій шахтних стояків як основного елементу кріплення гірничих виробок. Виявлено основні особливості конструкції і недоліки шахтних стояків. Сформульовано основні технічні вимоги при їх конструюванні. Запропоновано нову конструкцію податливого шахтного стояка з трубобетону. Наведено головні техніко-економічні показники нового шахтного стояка і доцільну область його застосування.

Ключові слова: підготовчі виробки, кріплення, шахтний стояк, трубобетон, критерії ефективності, вузол податливості, працездатність, попередній розпір, параметри стояка.

Prof. Litvinsky G. G. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

MINE PIPE-CONCRETE STRUT (SPC)

Analytical and historical review of the existing structures of mine struts as the main element of the support of mine workings has been given. The main features of the structure and disadvantages of the mine struts have been identified. The basic technical requirements for their design are formulated. New design of pliable mine struts made of pipe concrete is proposed. There have been given the main technical and economic features of the new mine strut and reasonable field of its application.

Key words: preliminary development, mine support, mine strut, pipe-concrete, efficiency criteria, compliance joint, operability, prestressing, strut parameters.