НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622.831.2 EDN: VAVRVH

Литвинский Г. Г.
Донбасский государственный технический университет
**E-mail: ligag@ya.ru*

ФУНКЦИОНАЛЬНО-МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПОРНО-ПОДАТЛИВОЙ ТРУБОБЕТОННОЙ СТОЙКИ С ПНЕВМОФРИКЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ НАГРУЗКИ

Предложена функционально-механическая модель распорно-податливой трубобетонной стойки, в которой трение впервые используется как управляемый канал передачи осевой нагрузки от трубобетонного штока к стальному корпусу. Конструкция функционально разделена на верхний пневмофрикционный узел податливости и нижний пневмоузел предварительного распора: первый формирует задаваемое рабочее сопротивление при осадке, второй обеспечивает контакт стойки с кровлей и почвой и начальное сопротивление. Силовой поток центрируется перекрёстными ортогональными опорами, а трубобетонный шток обеспечивает высокую продольную жесткость при минимальной металлоемкости. На основе поликритериальной оптимизации по прочности, общей и местной устойчивости получены рациональные параметры двух исполнений стойки для расчетных нагрузок 100 и 200 кН: корпус 60×4 и 75×4 мм, шток 50×2 и 65×2 мм при массе 16,4 и 22,7 кг соответственно. Требуемое давление в пневмоузлах не превышает 20,0 МПа. Показано, что модель создает основу для контроля нагрузки и перемещения со стороны породного контура. Сформулированы условия экспериментальной верификации коэффициента трения, стабильности сопротивления, герметичности и ресурса пневмоузлов.

Ключевые слова: *распорно-податливая стойка, трубобетон, пневмофрикционная передача нагрузки, предварительный распор, управляемая податливость, центрирование, поликритериальная оптимизация, мониторинг горного давления.*

Финансирование: *исследования проведены в рамках выполнения прикладной научно-исследовательской работы FRRU-2026-0004 «Обоснование способа и параметров обеспечения устойчивости подземных горных выработок с помощью адаптивной распорно-податливой крепи».*

1 Актуальность проблемы и цель исследований

Крепь горной выработки должна не просто выдержать расчётную нагрузку со стороны массива. Она обязана вступить в работу своевременно, не потерять устойчивость при неизбежной неполноте контакта, допустить контролируемое смещение пород без разрушения и сохранить приемлемую массу для транспортирования и монтажа. Именно совокупность этих требований, а не одно предельное усилие на стойку, определяет технический уровень современной крепи. Между тем большинство применяемых стоечных конструкций оптимизировано лишь по одной или двум функциям: стальные стойки — по несущей способности, стойки трения — по податливости, гидравлические — по распору. В результате повышение одного показателя достигается ценой ухудшения другого. Основные требования к шахтной стойке и закономерности взаимодействия крепи с массивом систематизированы в фундаментальных работах по механике подземных сооружений и проектированию крепей [1–3, 6].

Проблема особенно обостряется в подготовительных выработках, где горное давление изменяется по длине и во времени, фактическая жесткость контакта крепи с породным контуром неизвестна, а внецентренное приложение силы превращает центральное сжатие в сжатие стойки с изгибом. По данным анализа эксплуатации подготовительных выработок [5, 6], значительная часть выработок либо требует ремонта, либо закреплена с избыточным запасом. Оба результата имеют общую причину: крепь проектируется по ограниченному

набору исходных данных и затем эксплуатируется без информации о действительном силовом состоянии. Следовательно, резерв развития находится не в простом наращивании металла, а в управ-лении силовым взаимодействием системы «порода — крепь».

В эволюции стоечных крепей последовательно решались отдельные задачи. Деревянная стойка обеспечивала простоту и способность к смятию, но уступала по долговечности и повторному использованию. Стальная трубчатая стойка повысила несущую способность, однако сделала критичными устойчивость и качество опирания в породу. Стойка трения получила большой ход податливости, но сохранила случайный характер рабочего сопротивления. Гидравлическая стойка превратила сопротивление в управляемый параметр, однако потребовала использования цилиндра, рабочей жидкости, арматуры и высокой культуры обслуживания. Трубобетонная стойка повысила эффективность использования материала, но сама по себе не решила вопросов распора, податливости и контроля нагрузки [3, 6]. Поэтому следующий шаг должен состоять не в очередной модификации одного узла, а в новой функциональной организации стойки. Это соответствует общей эволюции горной крепи от пассивного сопротивления к адаптивным и комбинированным системам [5].

В настоящей работе реализован именно такой переход. Осевое усилие передаётся от трубобетонного штока к наружному корпусу через кольцевой пневмофрикционный контакт, нормальное давление в котором задаёт газовая оболочка. Узел податливости конструктивно отделён от нижнего узла предварительного распора, а оба силовых пневмоузла выполнены отдельно от центрирующих опор. Такое разделение функций позволяет независимо назначать начальный контакт, рабочее сопротивление и допустимый ход осадки шахтной стойки.

Цель работы — разработать функционально-механическую модель распорно-податливой трубобетонной стойки с пневмофрикционной передачей нагрузки, обосновать параметры её несущих элементов и силовых узлов и определить границы применимости расчётной схемы.

Основная идея работы состоит в том, что стойка за счет смены источника энергии от чисто механической к пневмо-распорной может получить значимые технические преимущества по габаритам, массе, геомеханическим параметрам и стоимости.

Объект исследования — шахтная распорная стойка для крепления подготовительных горных выработок.

Предмет исследования — основные параметрические соотношения в функционально-механической модели стойки.

Основные задачи исследования:

– разработать общую конструктивную схему стойки с пневмофрикционной передачей нагрузки;

– выполнить конструкторскую проработку важнейших функциональных элементов стойки — взаимодействия трубобетонного штока и корпуса стойки в заданном податливом режиме;

– обеспечить предварительный распор стойки с помощью пневмофрикционного узла в момент установки стойки;

– рассчитать корпус стойки с позиций поликритериальной оптимизации;

– задать требуемые геомеханические параметры распорно-податливой трубобетонной стойки.

2 Состояние вопроса

Традиционная стальная рамная крепь из профиля СВП остается основным средством поддержания подготовительных выработок, поскольку хорошо освоена производством и допускает значительные смещения в замковых соединениях. Однако её конструктивная схема принципиально неравнопрочна: верхняк преимущественно изгибается, стойки сжимаются с изгибом, а работа замков зависит от затяжки и состояния контактных поверхностей [3, 6].

Увеличение номера профиля повышает сопротивление, но одновременно увеличи-

вает массу рамы, трудоёмкость установки и нагрузку на транспортную систему. Самое существенное ограничение состоит в том, что рамная крепь не сообщает проекти-ровщику, какая часть её запаса фактически использована. Расчетные и конструктивные особенности рам из спецпрофиля подробно рассмотрены в [3, 6], а нормативные ограничения стальных элементов — в [9–11]. а также в работе [4].

Для объективной оценки разных типов крепи ранее были предложены [5, 18] нормированные безразмерные критерии технической эффективности НКТЭ. 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 ее взаимодействия с породным массивом.

Анкерная крепь переносит несущую функцию в массив и по удельной металлоёмкости превосходит рамные системы. Но анкер эффективен лишь при наличии работоспособной приконтурной зоны и достаточной длины закрепления. В разрушенных, обводнённых и интенсивно деформирующихся породах (например, в почве горной выработки), а также при необходимости охраны выработки для повторного использования, требуется несущий элемент, способный воспринимать нагрузку независимо от качества ближайшего слоя массива. Поэтому прямое противопоставление анкера и стойки некорректно: они решают разные аспекты общей задачи, дополняя друг друга. При этом комбинированные крепи «стойка-анкер» закономерно используют оба принципа. Стойка одновременно создает отпор в кровле и почве и тем самым способна ограничивать как опускание кровли, так и пучение почвы; анкер же передаёт усилие в локальную зону закрепления, хотя при разрушении этой зоны может утратить эффективность.

Стойки трения СТ, СТВ (рис. 1) и близкие к ним конструкции дали принципиально важный результат — большой ход податливости без сложной гидросистемы. Однако сила сопротивления формируется локальным зажатием клином или скобами. Нормальное давление на стойку распределено неравномерно, труба теряет устойчивость, коэффициент трения меняется вследствие загрязнения, коррозии и износа. Реально создаваемая клиновая затяжка во многом зависит от квалификации и силы рабочего. Поэтому паспортное сопротивление и реальное сопротивление стойки могут существенно различаться. Механизм трения используется, но не управляется: он остаётся следствием неопределённого контактного состояния. Именно это ограничивает силовой критерий стоек трения при высоком деформационном критерии [5, 7].



Рисунок 1 — Стальные стойки трения серии СТ30 семи типоразмеров с рабочим сопротивлением 300 кН

Гидравлические стойки устранили случайность сопротивления благодаря предохранительному клапану и рабочей жид-кости. Они обеспечивают высокий начальный распор и близкую к постоянной характеристику при осадке. Вместе с тем техническое совершенство гидравлического принципа сопровождается увеличением массы цилиндра, высокими требованиями к чистоте жидкости, герметичности, ремонту клапанов и защите штока. Для индивидуальной крепи очистных забоев эти затраты оправданы, но для массовой крепи подготовительных выработок они часто чрезмерны.

Газовая среда значительно легче и технологически проще, хотя её сжимаемость требует особой конструкции силовой схемы. Их эксплуатационная сложность остаётся принципиальным ограничением для массового применения в подготовительных выработках.

Трубобетонные элементы, исследованные в [7, 8], эффективно объединяют стальную оболочку и бетонное ядро. Стальная труба воспринимает растягивающие окружные напряжения и ограничивает поперечное расширение бетона, а бетон препятствует местной потере устойчивости оболочки и участвует в продольном сжатии. Эта совместная работа позволяет заметно уменьшить массу по сравнению со сплошным стальным стержнем. Однако предыдущие варианты трубобетонных стоек сохраняли механические узлы податливости — винтовые, клиновые или болтовые. Поэтому они содержали узел, в котором вновь возникали высокая сила затяжки, локальная деформация трубы и отсутствие оперативной регулировки.

Таким образом, предыдущие исследования подготовили необходимые элементы решения, но не создали единой функционально-механической модели. Трубобетон дал эффективный несущий стержень, трение — простую реализацию сопротивления податливости, гидропривод — регулируемое давление, датчики — информацию о нагрузке. Научная задача настоящей работы заключается в синтезе этих принципов без механического суммирования их недостатков. Для этого газовое давление используется не для прямого восприятия полного осевого усилия в длинном цилиндре, а для формирования нормальной силы в компактном кольцевом фрикционном контакте.

3 Конструкция шахтной стойки трубобетонной с предварительным распором СТПР

Для исключения рассмотренных противоречий была разработана стойка СТПР (рис. 2). Она состоит из трубчатого корпуса *1* и вставного телескопического штока *2*, выполненного из трубобетона, состоящего из стальной трубы *2.1* и бетонного заполнения *2.2*. Внутренний диаметр трубы корпуса *1* больше внешнего диаметра трубы штока *2.1* на 1…2 мм с возможностью телескопического перемещения. Корпус *1* и шток *2* на своих нижних концах снабжены крышками *1.1* и *2.1*.

Стойка снабжена опорами *3* и *4*, вжатых в породную поверхность горной выработки. Каждая опора состоит из круглых плит *3.1* и *4.1*, телескопически надетых на концы стойки и штока с приваренными трубчатыми стенками *3.2* и *4.2*.

Плиты опор *3.1* и *4.1*, выступают на 30…40 мм за пределы стенок *3.2* и *4.2* и образуют кольцевые консоли *3.3* и *4.3*, которые подкреплены уголками.

На плитах опор *3.1* и *4.1* приварены центраторы *3.4* в виде круглых прутков, ориентированных ортогонально друг другу по простиранию пород в кровле и падению в почве.

Кроме того, стойка СТПР снабжена пневмоузлами распора и податливости.

Узел податливости (рис. 3) состоит из стальной кольцевой обоймы *6.1* расположенной вокруг штока *2*, с опиранием на торец корпуса *1*, охватывая его своим кольцевым выступом *6.2*. Внутри обоймы *6.1* расположена кольцевая алюминиевая прокладка *6.3* с продольными разрезами, плотно прилегающая к штоку *2* и создающая силу трения при смещении штока с коэффициентом трения «алюминий-сталь», равным 0,5.

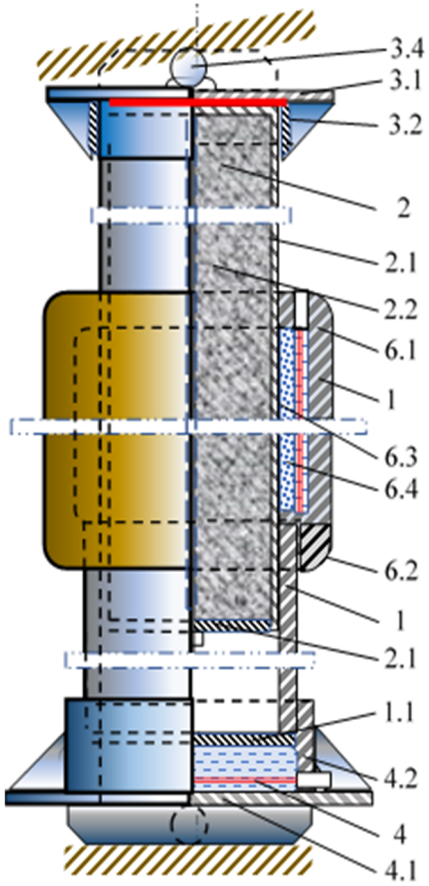


Рисунок 2 — Конструкция трубобетонной стойки трения с предварительным распором

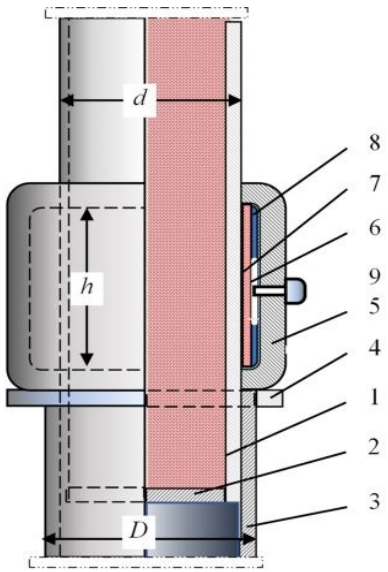


Рисунок 3 — Пневмоузел податливости стойки СТПР в виде сопряжения трубобетонного штока и корпуса

При подаче в узел податливости сжатого газа под действием его давления оболочка *6.4* расширяется, передавая усилие сжатия на алюминиевую прокладку *6.3*, которая равномерно обжимает внешний периметр штока *2*. При нагрузке на стойку ее шток *2* сдвигается вниз, чему препятствуют силы трения на поверхности алюминиевой прокладки *6.3*. Эта сила передаётся на обойму *6.1* и через неё — на корпус *1* стойки. Таким образом, нагрузка от давления пород кровли передаётся через опору *7* на шток *2*, затем силами трения — на кольцевую прокладку *6.3*, далее — на обойму *6.1*, корпус *1* и через опору *4* на почву.

Между обоймой *6.1* и кольцевой прокладкой *6.3* размещена герметичная резиновая оболочка *6.4* (например, из вакуумной резины), внутри которой размещен (опционально) мини-сенсор давления. К внутренней полости оболочки *6.4* подсоединен ниппель для подачи и стравливания сжатого воздуха, а коммутация выполнена через байонетный разъем на стойке (опционально).

Для обеспечения предварительного распора стойки между кровлей и почвой предусмотрен узел пневмораспора (рис. 4). Он состоит из стакана нижней опоры *4*, образованного кольцевой стенкой *4.2*, приваренной к ней плитой и донной крышкой корпуса *1.1*, которая закрывает камеру сверху. Внутрь камеры вставлена резиновая оболочка с мини-датчиком давления с коммутацией через байонетный разъем в стойке и ниппелем для подачи и стравливания газа под давлением.

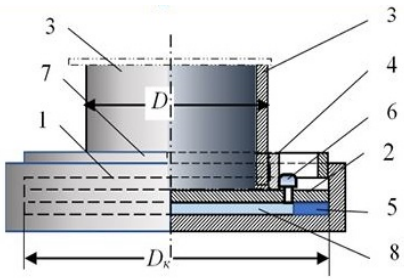


Рисунок 4 — Пневмоузел предварительного распора стойки СТПР

Силовая работа разделена между двумя разнесенными по высоте стойки независимыми пневмоузлами. Нижний узел выполняет функцию предварительного распора: после установки стойки и вначале выдвижения до упора в кровлю, а затем зажатия штока в узле податливости он при распоре выдвигает корпус и прижимает опорные плиты *3* и *4* к кровле и почве.

Верхний пневмоузел выполняет функцию сопротивления податливости и передачи нагрузки: кольцевая оболочка создаёт радиальное давление на разрезную алюминиевую прокладку, она прижимается к поверхности штока *2* и к обойме *10*, а возникающая сила трения передаёт осевую нагрузку на обойму и далее на корпус *1*. При превышении установленного сопротивления шток *2* проскальзывает, и стойка укорачивается на величину смещений пород.

Такое разделение функций между пневмоузлами распора и податливости принципиально важно. В гидравлической стойке одна обычно рабочая полость одновременно создает распор и определяет сопротивление. В предлагаемой конструкции начальный распор не обязан совпадать с рабочим сопротивлением податливости. Он назначается из условия надёжного контакта с породой и стабилизации положения стойки, тогда как сопротивление верхнего узла назначается по требуемой характеристике крепи. Следовательно, стойка получает два независимых управляющих параметра — давление распора P_p и давление пневмо-фрикционного узла $P_ф$.

Передача силового потока имеет замкнутую и конструктивно прозрачную последовательность: кровля — верхняя опора — трубобетонный шток — фрикционная прокладка — обойма — корпус — нижняя газовая опора — почва выработки. В этой силовой цепи нет болта или клина, усилие которого должно быть вручную преобразовано в контактное давление. Радиальное давление создаётся непосредственно газовой оболочкой по всей ее цилиндрической поверхности. Поэтому при сохранении герметичности и стабильности коэффициента трения сопротивление определяется измеряемым давлением, геометрией контакта и материалом прокладки.

Трубобетонный шток выполняет две функции. Во-первых, он воспринимает часть продольной силы бетонным ядром, что снижает требуемую площадь внешней стальной трубы. Во-вторых, бетон поддерживает тонкую стальную оболочку изнутри и препятствует её локальному выпучиванию. В принятой расчётной модели учитывается повышение характеристик бетона после обжатия в жидкой фазе; что было доказано в работах [13, 14].

Произведён расчет (табл. 1) двух модификаций базовых конструкций стойки: 1-го типа (на нагрузку 100 кН) и 2-го типа (на нагрузку 200 кН).

Базовая конструкция стойки работоспособна и без цифрового оснащения, однако давление в нижнем узле и перемещение штока могут регистрироваться мини-датчиками. Информационная функция стойки поэтому рассматривается как встроенная опциональная возможность, а не как обязательное условие силовой работы.

Таблица 1

Расчетные параметры двух исполнений стойки

Параметр стойки	Исполнение стойки 1	Исполнение стойки 2
Расчетная нагрузка, кН	100	200
Корпус $D \times t$, мм	60×4	75×4
Шток $D \times t$, мм	50×2	65×2
Длина корпуса / штока, м	1,70 / 0,800	1,70 / 0,800
Масса корпуса, кг	7,79	10,5
Масса штока, кг	5,70	8,78
Масса опор и узлов, кг	2,89	3,40
Полная масса стойки, кг	16,4	22,7

4 Расчетная модель стойки и поликритериальная оптимизация ее параметров

Расчет выполнен для двух уровней осевой нагрузки на стойку — 100 и 200 кН. Для стальных корпуса и оболочки штока приняты расчетное сопротивление стали $R_y = 340$ МПа, модуль упругости $E_s = 2{,}06 \cdot 10^5$ МПа и плотность $\gamma = 7850$ кг/м^3. Для бетона класса В30 принята призменная прочность $R_b = 17{,}0$ МПа. В расчетной модели обжатого бетона использовано его эффективное сопротивление 25,5 МПа и повышение модуля упругости на 40 % за счет обжатия смеси в жидкой фазе. Коэффициент условий работы принят $\gamma_c = 0{,}900$, коэффициент расчетной длины для стойки и штока $\mu = 0{,}750$.

Задача подбора сечений стойки сформулирована как минимизация массы при одновременном выполнении ограничений по ее прочности, общей и местной устойчивости. Принципиальное отличие от традиционного последовательного подбора сечений состоит в том, что диаметр и толщина стенки трубы не назначаются сначала по прочности с последующей проверкой устойчивости. Вариант рассматривается рациональным только тогда, когда запасы по лимитирующим предельным состояниям совпадают или предельно сближены. Иначе дополнительный металл не увеличивает реальную работоспособность, а лишь повышает массу и переносит возможность разрушения к другому слабому звену.

Для составного стержня корпус и трубобетонный шток имеют разные жесткости и длины. Поэтому приведенную изгибную жесткость следует определять энергетически [16], через эквивалентность работы изгиба:

$$\frac{1}{(EI)_{пр}} = \frac{1}{L}\left(\frac{L_к}{E_s I_к} + \frac{L_ш}{E_s I_s + E_b I_b} \right), \quad (1)$$

где $I_к$ — момент инерции корпуса, м^4;

I_s и I_b — моменты инерции стальной оболочки и бетонного ядра штока, м^4;

L — общая длина стойки, м.

В отличие от простого усреднения моментов инерции эта запись учитывает последовательное расположение участков различной жесткости вдоль оси стойки. Принятые расчетные предпосылки согласуются с СП 16.13330.2017 и Eurocode 3 [9–11].

Эквивалентная площадь для оценки приведенного радиуса инерции принимается [11, 12, 14]

$$A_{пр} = \frac{1}{L}\left[A_к L_к + \left(A_s + \frac{E_b}{E_s} A_b \right) L_{шт} \right]. \quad (2)$$

Несущая способность стойки оценивается выражением

$$N_{Rd} = \varphi\left(A_к R_y + A_s R_y + A_b R_b, e_{ff} \right) \gamma_c . \quad (3)$$

Эта модель является инженерным приближением: точная форма потери устойчивости зависит от жесткости узлов, зазоров и начальной кривизны. Поэтому окончательное подтверждение параметров требует пространственного конечно-элементного расчета и стендового испытания.

Перебор стандартных размеров показал, что для нагрузки 100 кН рациональными ближайшими по стандартам являются корпус 60×4 мм и шток 50×2 мм, а для нагрузки 200 кН — корпус 75×4 мм и шток 65×2 мм. Уменьшение толщины корпуса до 3 мм снижает массу, но приводит к недостаточной общей устойчивости составной стойки. Увеличение диаметра при чрезмерном уменьшении толщины не даёт гарантированного выигрыша: рост радиуса инерции компенсируется уменьшением площади и повышенной чувствительностью к местной деформации, овальности и повреждениям при монтаже [11, 12].

Расчётные массы базовых исполнений составляли 16,4 и 22,7 кг. Стойки такой массы переносятся одним рабочим и устанавливаются в течение 5…10 мин.

Для промышленного исполнения необходимо дополнительно назначить припуски в размерах на коррозию, допуски овальности, защиту тонкостенного штока от ударов и локальное усиление зон передачи давления.

5 Пневмофрикционный узел податливости

Рабочее сопротивление пневмоузла податливости возникает на цилиндрической поверхности высотой h [7, 8]. При равномерном давлении $p_ф$ суммарная нормальная сила равна:

$$N_n = p_ф \pi D_ш h. \quad (4)$$

Предельная сила трения определяется выражением:

$$F_{тр} = f p_ф \pi D_ш h, \quad (5)$$

где f — коэффициент трения между алюминиевой прокладкой и стальной поверхностью штока.

Коэффициент трения зависит от шероховатости, наличия воды и загрязнений, контактной температуры, износа, скорости скольжения и внедрения частиц породы. Поэтому значение $f = 0{,}5$ следует рассматривать как проектное допущение, а не как окончательно установленную константу.

Формулы показывают главное преимущество кольцевой схемы обжатия штока: осевая сила многократно превышает силу, которую газ создал бы на небольшом торцевом поршне, поскольку давление действует на развитую боковую поверхность штока.

Диапазон давления для установки стойки до 20,0 МПа достаточен для обоих расчетных исполнений пневмоузлов с запасом.

Кольцевая прокладка должна иметь продольные разрезы, позволяющие ей уменьшать диаметр без образования складок. Газовая оболочка должна передавать давление равномерно и не входить непосредственно в зону трения. Стальная обойма воспринимает окружное давление и передает осевую реакцию на торец корпуса. Её жесткость выбирается из условия, чтобы радиальная деформация не вызывала заметного падения контактного давления. В первом приближении обойма считается жесткой; в уточнённой модели её деформация должна быть включена в совместную задачу «оболочка — прокладка — шток — обойма».

После достижения заданного сопротивления податливости 10 или 20 МПа шток начинает перемещаться относительно прокладки при давлении пород, превышающем эти сопротивления. При неизменном газовом давлении сила сопротивления остаётся близкой к постоянной, но только пока контактная площадь, коэффициент трения и геометрия оболочки изменяются незначительно. Сжимаемость газа хотя сама по себе не задаёт стабильную характеристику; но она компенсируется малым изменением объёма кольцевой полости при осевом скольжении. Именно поэтому газ используется для радиального обжатия, а не как основной осевой упругий элемент.

Регулирование давления $p_ф$ позволяет получить семейство характеристик «сопротивление — осадка». Базовое промышленное исполнение может работать при одном заранее установленном давлении. Программируемое изменение сопротивления по сигналам датчиков является перспективной отслеживающей функцией стойки.

6 Нижний пневмоузел предварительного распора

Нижний узел образован стаканом опоры и торцевой крышкой корпуса, выполняющей функцию поршня. Сила предварительного распора определяется выражением

$$F_p = p_p \pi D_n{}^2 / 4, \quad (6)$$

где D_n — эффективный диаметр поршня.

Газовая оболочка передаёт давление, но не увеличивает геометрическую площадь поршня; поэтому диаметр D_n должен задаваться конструкцией нижнего узла и не обязан совпадать с диаметром корпуса.

Для исполнения стойки 1 принят эффективный диаметр поршня $D_n = 60{,}0$ мм. Предварительный распор 50,0 кН создаётся при $p_p = 17{,}7$ МПа; при предельном давлении 20,0 МПа распор составляет 56,5 кН. Для исполнения стойки 2 диаметр корпуса 75,0 мм недостаточен для получения распора 100 кН при 20,0 МПа: соответствующее давление составило бы 22,6 МПа.

Поэтому эффективный диаметр нижнего поршня увеличен до 80,0 мм. При таком диаметре распор 100 кН обеспечивается давлением 19,9 МПа. Принятое конструктивное уточнение позволяет унифицировать предельное рабочее давление обоих силовых узлов на уровне $p_p = 20{,}0$ МПа.

Предварительный распор не должен автоматически приниматься равным половине несущей способности во всех условиях. Его рациональная величина определяется жёсткостью кровли и почвы, допустимым контактным напряжением, устойчивостью стойки при монтаже и требованием немедленного включения стойки в работу. Слишком малый распор оставляет зазоры и допускает ударное нагружение; чрезмерный распор способен вызвать местное разрушение слабой породы или преждевременное скольжение верхнего узла. Поэтому распор, равный $0{,}5N$, рассматривается как исходный расчётный ориентир, а не как универсальный норматив.

Измерение давления в пневмоузле распора позволяет оценивать осевую реакцию стойки только при малом влиянии трения уплотнений. В реальной стойке давление будет отражать сумму внешней нагрузки, сопротивления уплотнений и изменения объема газа. Поэтому формулировка «давление в пневмоузле пропорционально нагрузке» справедлива приближенно. Для превращения нижнего узла в измерительный канал требуется калибровочная зависимость

$$F = F(p, u, T), \qquad (7)$$

где u и T — перемещение u и температура T, которые следует учитывать при калибровке узла распора.

После калибровки узел способен выполнять двойную функцию — создавать распор стойки и выдавать диагностический сигнал о действующей нагрузке на стойку в любой момент времени.

В результате о возможностях и ограничениях различных существующих стоек крепи можно судить по полученным цифрам сопоставительной таблицы 2.

7 Монтаж и информационная функция стойки

Монтаж выполняют в следующей последовательности: стойку устанавливают между почвой и кровлей; перекрёстные опорные элементы на опорах ориентируют взаимно перпендикулярно. Шток выдвигают до упора в кровлю, затем в верхний пневмоузел податливости подают газ под давлением, соответствующим требуемому рабочему сопротивлению; после чего в нижнем пневмоузле создают заданный предварительный распор.

Ожидаемое время монтажа менее 5…10 мин тем не менее должно быть подтверждено хронометражем в реальных условиях с учётом доставки рукавов, подключения, проверки герметичности и ориентации опор.

Таблица 2

Функциональное сравнение стоечных систем

Тип крепи	Распор	Податливость	Регулируемость	Основное ограничение
Стойка трения	Низкий или отсутствует	большая	ограниченная	случайность затяжки и трения
Гидравлическая стойка	высокий	большая	высокая	масса, стоимость, обслуживание
Трубобетонная стойка прежних схем	зависит от узла	зависит от узла	низкая	механический узел податливости
Предлагаемая пневмофрикционная	независимо задаваемый	до 0,800 м	давлением $p_ф$	необходимость верификации

Интерфейс стойки может включать датчик давления нижнего узла и датчик перемещения штока. Совместная регистрация давления $p(t)$ и перемещения $u(t)$ позволяет восстановить историю нагружения, обнаружить начало податливого режима и оценить остаточную податливость. Полезность такой системы состоит в переходе от визуальной оценки состояния стоечной крепи к измеряемым и фиксируемым ее показателям: фактическому распору, скорости осадки, использованной податливости. Для шахтного применения электронные компоненты должны соответствовать требованиям взрывозащиты, электромагнитной совместимости и герметичности. Поэтому цифровая подсистема стойки остается опциональной и не влияет на базовую безопасность силовой конструкции. Это приближает стойку как таковую или всю стоечную крепь выработки для создания интеллектуального интерфейса горизонта или шахты в целом при разработке цифровых двойников или системы IoT. Эти функции особенно ценны при управлении поведением массива и для предиктивной оценки устойчивости горных выработок.

8 Обсуждение результатов и выполнение верификации

Предлагаемая конструкция стойки отличается от известных стоек трения способом формирования нормальной силы отпора. Если в клиновом узле известных стоек трения она является трудно контролируемым результатом затяжки и деформации трубы, то в предложенном пневмофрикционном узле податливости она задаётся измеряемым давлением на развитой боковой поверхности штока. Поэтому основная научная новизна заключается в переводе трения из случайного контактного явления в рассчитываемый механизм передачи нагрузки [5].

Второе отличие состоит в разделении функций предварительного распора и податливости. Верхний пневмоузел формирует силовую связь штока с корпусом и заданную характеристику сопротивления при смещении пород; нижний пневмоузел создаёт предварительный распор и может использоваться для оценки действующей осевой нагрузки на стойку. Такое разделение исключает перегрузку одного узла противоречивыми функциями.

Третье отличие — согласование жесткого трубобетонного штока с центрирующими опорами. Высокоэффективный шток может потерять устойчивость, если эксцентриситет преждевременно вызывает его изгиб; поэтому центрирование является важной частью силовой модели стойки.

Расчет показывает техническую реализуемость двух исполнений стойки, но не заменяет эксперимент [17]. В первую очередь необходимы трибологические испытания пары «алюминиевая прокладка — стальной шток» при сухом, влажном и загрязнённом контакте. Следует получить зависимости коэффициента трения от давления, скорости, длины пути и числа циклов. Второй блок испытаний должен определить герметичность и ресурс газовых оболочек при 20–25 МПа, включая повреждение частицами и старение материала. Третий блок — стендовые осевые испытания полной стойки с заданным эксцентриситетом, измерением давления, перемещения и деформаций корпуса.

Особое внимание необходимо уделить переходным режимам. При начале скольжения статический коэффициент трения может превышать кинетический, что вызывает скачок сопротивления. Неравномерный контакт способен вызвать перекос штока и локальное заклинивание. Изменение температуры газа влияет на давление в силовых узлах. Эти эффекты не опровергают принцип, но определяют конструкцию прокладки, объем компенсационной полости и допустимый диапазон регулирования. Только после их количественной оценки можно утверждать постоянство сопротивления и назначать нормативную характеристику.

Выполненная поликритериальная оптимизация подтверждает, что минимальная

масса достигается не максимальным использованием прочности каждого материала отдельно, а согласованием предельных состояний прочности и устойчивости всей стойки. Тем не менее приведенная стержневая модель может быть уточнена с использованием подходов, развитых в [15], поскольку она не учитывает локальную податливость обоймы, контакт с опорами и начальную кривизну. Поэтому следующим расчётным этапом должен стать нелинейный конечно-элементный анализ с учетом условий на контактах и геометрических несовершенств. Его целью будет не замена инженерных формул, а калибровка коэффициента расчётной длины и проверка локальных напряжений.

Практический потенциал конструкции определяется сочетанием четырех эффектов: масса 16,4–22,7 кг; регулируемое сопротивление до 200 кН; предварительный распор 50–100 кН; измеряемые параметры работы. Ни один из эффектов по отдельности не является достаточным. Преимущество возникает только при их совместной реализации, поскольку легкая, но нерегулируемая стойка остается пассивной, а регулируемая, но тяжелая — теряет технологичность. Предложенная модель целенаправленно разрешает этот конструктивный компромисс.

Выводы

1. Сформулирована функционально-механическая модель распорно-податливой трубобетонной стойки, в которой осевая нагрузка передается через управляемый кольцевой пневмофрикционный контакт корпуса и штока. Такое решение устраняет принципиальную зависимость сопротивления от ручной клиновой или болтовой затяжки [5, 7].

2. Разделение верхнего узла податливости и нижнего узла предварительного распора обеспечивает независимое назначение рабочего сопротивления и начального контакта с породным контуром. Перекрестные опорные элементы контакта с породой уменьшают эксцентриситет, но не отменяют необходимости проверки сжатия с изгибом.

3. Поликритериальная оптимизация по прочности, общей и местной устойчивости дала рациональные параметры [11, 12, 14]: для 1-го типа стойки — корпус из труб 60×4, шток 50×2 мм и $N = 100$ кН; для 2-го типа стойки — корпус 75×4, шток 65×2 мм и $N = 200$ кН. Уточнённая расчетная масса стоек составляет соответственно 16,4 и 22,7 кг.

4. Диапазон до 20,0 МПа достаточен для работы пневмоцилиндров обоих пневмоузлов каждого из исполнений стоек. В нижнем узле 1-го исполнения стойки эффективный диаметр поршня 60,0 мм обеспечивает предварительный распор 50,0 кН при $p_p = 17{,}7$ МПа. Для исполнения стойки 2 принят диаметр поршня 80,0 мм, при котором распор 100 кН достигается при $p_p = 19{,}9$ МПа. Таким образом, распорные пневмоузлы обоих исполнений также работают при давлении не выше 20,0 МПа.

5. Расчетная модель стойки подтверждает техническую реализуемость предложенных принципов, но промышленное применение требует стендовой верификации коэффициента трения, стабильности характеристики при скольжении, проверки ресурса газовых оболочек, их герметичности и работы при эксцентриситете с учетом требований СП 16.13330.2017 [10]. После такой верификации стойка может стать не только несущим, но и измерительным элементом крепи подготовительных выработок [5].

Предлагаемая конструкция шахтных стоек позволяет перейти к разработке новых паспортов крепления со стоечно-анкерной крепью подготовительных горных выработок подземных горизонтов шахт и рудников.

Список источников

1. Баклашов И. В., Картозия Б. А. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. М. : Студент, 2012. 543 с.

2. Hoek E. Practical Rock Engineering. 2010. 237 p.

3. Rulka K. Stalowe obudowy odrzwiowe. Katowice : GIG, 2008. 263 s.

4. Structural Performance of Cold-Formed High-Strength Steel Circular Hollow Sections under Combined Compression and Bending / J.-L. Ma, M. Pandey, T.-M. Chan, B. Young // Journal of Structural Engineering. 2022. Vol. 148. No. 10. Art. 04022087. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003438 EDN HOVAFI

5. Литвинский Г. Г. Горная крепь: эволюция развития и критерии технической эффективности // Сборник научных трудов ДонГТУ. 2019. № 15 (58). С. 5–19. EDN RWWCPJ

6. Литвинский Г. Г., Гайко Г. И., Кулдыркаев Н. И. Стальные рамные крепи горных выработок. К. : Техника, 1999. 216 с.

7. Литвинский Г. Г. Шахтная трубобетонная стойка (СТБ) // Сборник научных трудов ДонГТУ. 2019. № 17 (60). С. 5–16. EDN XXXJJJ

8. Литвинский Г. Г., Фесенко Э. В. Теория расчета центрально сжатых трубобетонных конструкций стоечной крепи // Сборник научных трудов ДонГТУ. 2012. № 38. С. 10–16.

9. EN 1993-1-1:2005+A1:2014. Eurocode 3: Design of steel structures. Brussels : CEN, 2014.

10. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. М. : Минстрой России, 2017.

11. Gardner L., Nethercot D. A. Designers' Guide to Eurocode 3. 2nd ed. London : Thomas Telford, 2020.

12. Chen J., Chan T.-M. Buckling of high strength steel circular hollow section columns // Thin-Walled Structures. 2024. Vol. 195. Art. 111456.

13. Wu Q., She Z., Yuan H. Experimental study of UHPC-encased CFST stub columns under axial compression // Structures. 2021. Vol. 32. P. 433–447. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.03.053 EDN BFAGOL

14. A pressure forming technique for concrete-filled steel tubes and mechanical properties of the compressed concrete / K. Wang [et al.] // Industrial Construction. 2025. Vol. 55. No. 1. P. 161–168. DOI: 10.3724/j.gyjzg24061105 EDN FIXUBC

15. Basaglia C., Camotim D., Silvestre N. GBT-based buckling analysis of steel cylindrical shells under combinations of compression and external pressure // Thin-Walled Structures. 2019. Vol. 144. Art. 106274. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106274 EDN ANIPMJ

16. Ясинский Ф. С. О сопротивлении сжатых стержней продольному изгибу // Известия Петербургского политехнического института. 1905. Т. 3. № 1. С. 1–28.

17. Экспериментальные исследования сжатых трубчатых стоек / под ред. А. В. Пермякова. СПб. : СПбГАСУ, 2023. 112 с.

18. Литвинский Г. Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов. Донецк : Норд-Пресс, 2008. 207 с.

© Литвинский Г. Г., 2026

Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ГБП ДонГТУ Кизияровым О. Л., к.т.н., доц. каф. ГБП ДонГТУ Шульгиным П. Н.

Статья поступила в редакцию 05.10.2026.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Литвинский Гарри Григорьевич, *д-р техн. наук, профессор каф. геотехнологии и промышленной безопасности*
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия, e-mail: ligag@ya.ru

Litvinsky G. G. *(Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, e-mail: ligag@ya.ru)*

FUNCTIONAL-MECHANICAL MODEL OF AN EXPANSION-YIELDING CONCRETE-FILLED TUBE PROP WITH PNEUMATIC-FRICTION LOAD TRANSFER

A functional-mechanical model of an expansion-yielding concrete-filled tube prop is proposed, in which friction is used for the first time as a controllable channel for transferring axial load from the

concrete-filled tube rod to the steel casing. The construction is functionally divided into an upper pneumatic-friction yielding unit and a lower pneumatic prestressing unit: the former generates a specified working resistance under subsidence, while the latter ensures contact between the prop and the roof and soil and provides the initial resistance. The power path is centered by crosswise orthogonal supports, while the concrete-filled tube rod provides high longitudinal stiffness at minimal steel intensity. Based on multicriteria optimization according to the strength, general and local stability, the rational parameters of two prop designs were obtained for estimated loads of 100 and 200 kN: casing of 60×4 and 75×4 mm, rod of 50×2 and 65×2 mm, with corresponding masses of 16,4 and 22,7 kg. The required pressure in the pneumatic units does not exceed 20,0 MPa. It is shown that the model provides a basis for controlling the load and displacement from the rock contour side. The conditions for the experimental verification of the friction coefficient, resistance stability, airtightness and service life of the pneumatic units are formulated.

Key words: *expansion-yielding prop, concrete-filled tube, pneumatic-friction load transfer, prestressing, controllable yielding, centering, multicriteria optimization, monitoring of underground pressure.*

Funding: *the research was conducted as a part of the applied scientific research project FRRU-2026-0004 "Justification of the method and parameters for ensuring the stability of underground mining workings using the adaptive expansion-yielding support".*

References

1. Baklashov I. V., Kartoziya B. A. Mechanics of underground structures and support systems [Mekhanika podzemnyh sooruzhenij i konstrukcii krepej]. M. : Student. 2012. 543 p.

2. Hoek E. Practical Rock Engineering. 2010. 237 p.

3. Rulka K. Stalowe obudowy odrzwiowe. Katowice : GIG, 2008. 263 p.

4. Ma J.-L., Pandey M., Chan T.-M., Young B. Structural Performance of Cold-Formed High-Strength Steel Circular Hollow Sections under Combined Compression and Bending. Journal of Structural Engineering. 2022. Vol. 148. No. 10. Art. 04022087. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003438 EDN HOVAFI

5. Litvinsky G. G. Mine support: evolution of development and criteria of technical efficiency [Gornaya krep': evolyuciya razvitiya i kriterii tekhnicheskoj effektivnosti]. Collection of Scientific Papers of DonSTU. 2019. No. 15 (58). Pp. 5–19. EDN RWWCPJ

6. Litvinsky G. G., Gajko G. I., Kuldyrkaev N. I. Steel frame supports for mine workings [Stal'nye ramnye krepi gornyh vyrabotok]. K. : Tekhnika. 1999. 216 p.

7. Litvinsky G. G. Mine pipe-concrete strut (SPC) [Shahtnaya trubobetonnaya stojka (STB)]. Collection of scientific papers of DonSTU. 2019. No. 17 (60). Pp. 5–16. EDN XXXJJJ

8. Litvinsky G. G., Fesenko E. V. Theory of calculation of the axially-loaded guncrete structures in mining support [Teoriya rascheta central'no szhatyh trubobetonnyh konstrukcij stoechnoj krepi]. Collection of scientific papers of DonSTU. 2012. No. 38. Pp. 10–16.

9. EN 1993-1-1:2005+A1:2014. Eurocode 3: Design of steel structures. Brussels : CEN, 2014.

10. SP 16.13330.2017. Steel structures [SP 16.13330.2017. Stal'nye konstrukcii]. M. : Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation. 2017.

11. Gardner L., Nethercot D. A. Designers' Guide to Eurocode 3. 2nd ed. London : Thomas Telford, 2020.

12. Chen J., Chan T.-M. Buckling of high strength steel circular hollow section columns. Thin-Walled Structures. 2024. Vol. 195. Art. 111456.

13. Wu Q., She Z., Yuan H. Experimental study of UHPC-encased CFST stub columns under axial compression. Structures. 2021. Vol. 32. Pp. 433–447. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.03.053 EDN BFAGOL

14. Wang K. [et al.]. A pressure forming technique for concrete-filled steel tubes and mechanical properties of the compressed concrete. Industrial Construction. 2025. Vol. 55. No. 1. Pp. 161–168. DOI: 10.3724/j.gyjzg24061105 EDN FIXUBC

15. Basaglia C., Camotim D., Silvestre N. GBT-based buckling analysis of steel cylindrical shells under combinations of compression and external pressure. Thin-Walled Structures. 2019. Vol. 144. Art. 106274. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106274 EDN ANIPMJ

16. Yasinskiy F. S. About the resistance of compressed rods to longitudinal curvature [O soprotivlenii szhatyh sterzhnej prodol'nomu izgibu]. Izvestiya Peterburgskogo politekhnicheskogo instituta. 1905. Vol. 3. No. 1. Pp. 1–28.

17. Experimental studies of the compressed tubular props [Eksperimental'nye issledovaniya szhatyh trubchatyh stoek]. Eds. Permyakov A. V. SPb. : SPbGASU. 2023. 112 p.

18. Litvinskiy G. G. Analytical theory of rock and massif strength [Analiticheskaya teoriya prochnosti gornyh porod i massivov]. Donetsk : Nord-Press. 2008. 207 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Litvinsky Garry Grigorievich, *Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Geotechnology and Industrial Safety*
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Russia, e-mail: ligag@ya.ru