

## Повышение эффективности и безопасности трубопроводного транспорта твердеющих закладочных смесей в глубокие шахты

Ляшенко В. И.<sup>1\*</sup>, Франчук В. П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии, г. Желтые Воды, Украина

<sup>2</sup> Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», г. Днепр, Украина  
\*e-mail: vilyashenko2017@gmail.com

### Реферат

**Актуальность.** Добыча минерального сырья оказывает отрицательное влияние на окружающую природную среду. Нейтрализация этого влияния достигается за счет технологий добычи полезных ископаемых различными вариантами систем разработки с заполнением выработанных пространств твердеющими закладочными смесями различного состава и прочности. Однако их применение усложняется из-за транспортирования по трубопроводу твердеющих закладочных смесей на значительные расстояния по вертикали и горизонтали к месту их укладки, повышенных материальных и трудовых затрат, дефицита материала для приготовления смесей.

**Цель исследования.** Повышение эффективности и безопасности трубопроводного транспорта твердеющих закладочных смесей в глубокие шахты на основе определения основных параметров установок трубопроводного транспорта (УВТ) твердеющей закладочной смеси исходя из условий надежной ее доставки к месту укладки при минимальных затратах.

**Методология исследования.** Проведен анализ литературных источников, использованы методы теоретических обобщений с применением математической статистики, физическое и математическое моделирование, выполнены расчеты и технико-экономические обоснования, проведены лабораторные и натурные экспериментальные исследования, промышленные испытания в условиях глубоких шахт по стандартным и новым методикам.

**Результаты.** Разработаны и внедрены в производство новые устройства УСД-1 для доставки твердеющих закладочных смесей в глубокие шахты, обеспечивающие снижение избыточного давления в трубопроводе, смонтированном в восстающей выработке этажа 895–825 м шахты «Новая–Глубокая», г. Желтые Воды, Украина.

**Выводы.** Рекомендовано значение максимальной длины трубопровода между узлами перегрузки в пределах 415–508 м, а превышение пункта аварийной разгрузки над горизонтом – 11 м. На последнем участке вертикального трубопровода (переходящего в горизонтальный) выбирается длина, обеспечивающая нормальное транспортирование смеси. Установлена эффективность транспортирования твердеющей закладочной смеси, которая повышается за счет устранения ее расслоения на горизонтальном участке трубопровода при условии  $v_{\min} < v < v_{\max}$ , где  $v$ ,  $v_{\min}$ ,  $v_{\max}$  – скорости смеси, соответствующие установившемуся расчетному режиму транспортирования, нахождению частиц твердого заполнителя на пределе во взвешенном состоянии и максимальному уровню заполнения вертикального става закладочного трубопровода.

**Ключевые слова:** глубокие шахты; трубопроводный транспорт; избыточное давление; твердеющие закладочные смеси; эффективность; безопасность.

**Благодарность.** В создании, совершенствовании и внедрении научных разработок принимали участие и оказывали содействие специалисты: ГП «УкрНИПИИпромтехнологии» и ГП «ВостГОК» (г. Желтые Воды, Украина); Национального технического университета «Днепропетровская политехника», г. Днепр, Украина. В работе также принимали участие И. К. Поддубный, В. Н. Платонов, П. И. Рязузов, В. З. Дятчин, А. Х. Дудченко, А. Г. Скоратенко и др.

**Введение.** Добыча минерального сырья оказывает отрицательное влияние на окружающую природную среду. Нейтрализация этого влияния достигается за

счет природо- и ресурсосберегающих технологий добычи полезных ископаемых [1, 2]. К таким технологиям авторы относят прежде всего различные варианты систем разработки с заполнением выработанных пространств твердеющими закладочными смесями различного состава и прочности [3, 4]. Однако их применение усложняется из-за транспортирования по трубопроводу твердеющих закладочных смесей на значительные расстояния по вертикали и горизонтали к месту их укладки, повышенных материальных и трудовых затрат, дефицита материала для приготовления смесей [5, 6]. Поэтому разработка новых методов, технологий и технических средств комплексного использования отходов горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, обеспечивающих надежность транспортирования твердеющих закладочных смесей по трубопроводу, безопасность работ, возможность использования для закладки местных некондиционных материалов и отходов производства, снижение затрат на добычу сырья при сохранении земной поверхности – задача, имеющая важное народнохозяйственное значение.

Для решения поставленной задачи авторами выполнен анализ литературных источников, использованы метод теоретических обобщений с применением математической статистики, физическое и математическое моделирование, выполнены расчеты и технико-экономические обоснования, проведены лабораторные и натурные экспериментальные исследования, а также промышленные испытания в условиях действующих предприятий по стандартным и новым методикам [7, 8]. Данная работа является продолжением исследований, основные научные и практические результаты которых наиболее полно приведены в работах [9, 10].

**Цель исследования** – повышение эффективности и безопасности трубопроводного транспорта твердеющих закладочных смесей в глубокие шахты на основе определения основных параметров установок трубопроводного транспорта (УВТ) твердеющей закладочной смеси исходя из условий надежной ее доставки к месту укладки при минимальных затратах.

Направления исследований:

- *определить* технические требования к твердеющей закладочной смеси исходя из условий надежного транспорта по трубопроводам при минимальных затратах;
- *предложить* методику расчета основных параметров установок трубопроводного транспорта (УВТ) твердеющих закладочных смесей в глубокие шахты;
- *разработать* и внедрить в производство новые технологии и технические средства для приготовления и доставки твердеющих закладочных смесей в глубокие шахты.

**Результаты и их обсуждение.** Особенно актуальна проблема трубопроводного транспорта закладочных смесей в глубокие шахты, поскольку постоянное понижение горных работ при разработке полезных ископаемых является установившейся тенденцией [11]. Определенные трудности связаны прежде всего с повышенным износом труб в результате высоких давлений и скоростей транспортирования закладочного материала, особенно на криволинейных участках. Кроме того, при подаче твердеющей смеси на большие глубины и возникновении закупорки в нижней части магистрального трубопровода возрастает статическое давление, которое приводит к его разрушению и, как следствие, заиливанию горных выработок и большим потерям смеси. Для ликвидации аварии требуются значительные средства и остановка закладочного процесса на длительный период [12, 13].

Как показывает практика, прохождение гидросмеси на горизонтальных и криволинейных участках закладочных трубопроводов сопровождается повышенной

вибрацией, так как при выбросах закладочной смеси в камеру развиваются большие пульсации давления в трубопроводе, вплоть до гидравлических ударов, что небезопасно. Таким образом, безопасное применение трубопроводного транспорта для доставки гидросмесей на глубокие горизонты шахты возможно лишь при выполнении мероприятий по снижению избыточных давлений в трубопроводах [14, 15].

Анализ опыта закладки показал, что для снижения высоких давлений и скоростей транспортирования гидросмесей в глубокие шахты необходимо следующее [16, 17]:

- снабжение вертикального участка закладочного трубопровода в средней его части горизонтальной петлей, в которой течение пульпы изменяется с вертикального на горизонтальное петлеобразное (патент ПНР № 54203);

- применение в горизонтальном отрезке труб большего диаметра, чем в вертикальном, в результате чего в вертикальной части трубопровода происходят большие энергетические потери при одновременном их снижении на горизонтальном; использование в нижней части трубопровода разгрузочных клапанов; монтаж разрывных дисков, с помощью которых происходит автоматическое регулирование давления, т. е. автоматическое отключение трубопровода от закладочной установки при увеличении давления до величин, превышающих нормальное рабочее давление;

- установка на вертикальном участке закладочного трубопровода промежуточной емкости и введение в верхнюю ее часть закладочного и воздухоотводящего трубопроводов, посредством которых происходит разрыв потока твердеющей смеси и соединение его с атмосферой (патент ПНР № 58854).

Вместе с тем для этого требуются:

- дополнительные затраты на сооружение специальной выработки или на поддержание существующей для размещения громоздкого петлевого участка закладочного трубопровода;

- необходима остановка транспортирования смеси при закупорке трубопровода;

- весьма трудоемка ликвидация закупорки и большие потери закладочной смеси при выпуске ее из трубопровода.

Отмеченные недостатки учтены при создании нового устройства для снижения избыточного давления (УСД) в трубопроводе, смонтированного в восстающей выработке этажа 895–825 м (шахта «Новая–Глубокая», г. Желтые Воды, Украина), т. е. несколько выше критической отметки из условия прочности трубопровода (рис. 1). На рис. 1 обозначены: 1 – вертикальный трубопровод; 2, 3 – приемная и промежуточная емкости соответственно; 4 – конусная часть емкости; 5 – аварийный трубопровод; 6, 8 – камеры для аварийного сброса смеси и подлежащие закладке на глубоких горизонтах соответственно; 7 – магистральный закладочный трубопровод; 9 – отвод; 10 – отводящий трубопровод; 11 – промысловый патрубок; 12 – накладка; 13 – предохранительная диафрагма.

УСД состоит из вертикального участка 1 закладочного трубопровода, который введен в промежуточную емкость 3. Нижняя ее часть 4 выполнена конусной, переходящей в магистральный закладочный трубопровод 7 и далее в горизонтальный. В верхней части емкости установлен отвод 9 с трубопроводом 10, в который вмонтирован промысловый патрубок 11. Трубопровод 10 введен в дополнительную приемную емкость 2, переходящую в аварийный трубопровод 5 длиной около 80 м и входящий другим концом в камеру 6 горизонта 895 м. Для предотвращения попадания посторонних предметов, а также разбрызгивания закладочной смеси емкостью 2 в верхней ее части закрыта накладкой 12.

Трубопроводы *1* и *10* также закреплены фланцевыми быстроразъемными соединениями, что позволило исключить выбросы порций смеси из промежуточных емкостей и улучшить условия труда рабочих по обслуживанию установки. Конструкцией предусматривалось отводящий трубопровод снабдить датчиком контроля перелива закладочной смеси.

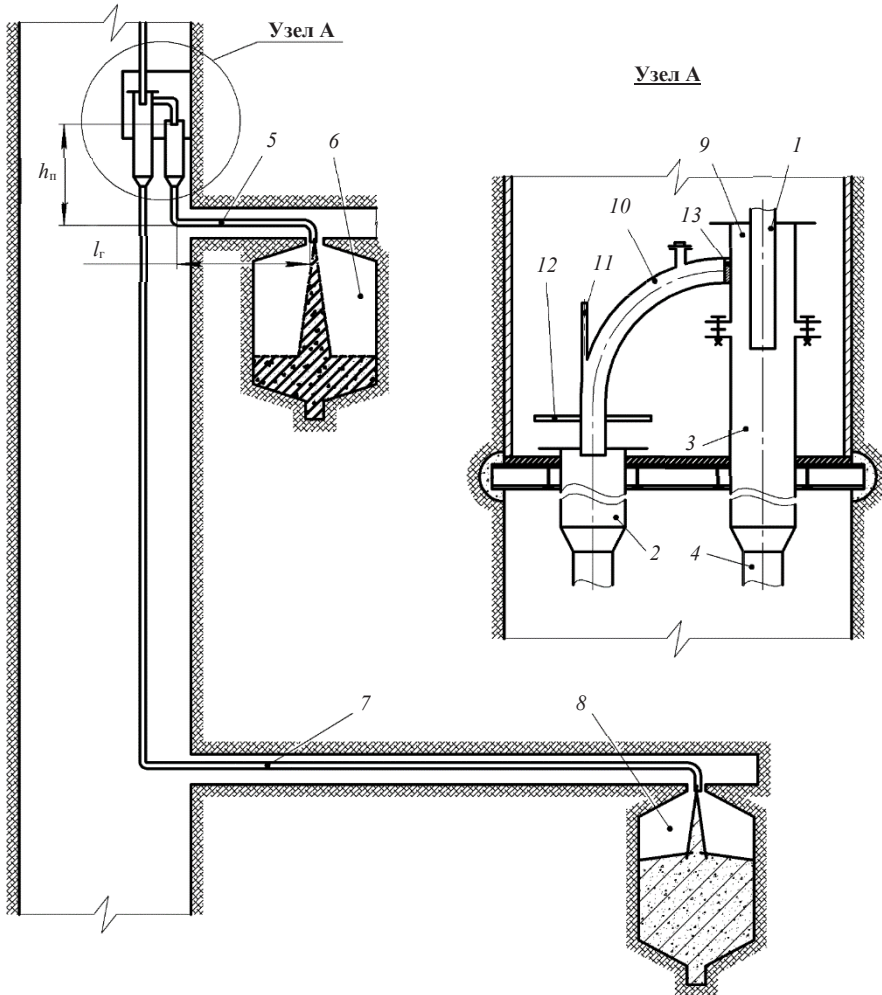


Рис. 1. Устройство для транспортирования твердеющих закладочных смесей в глубине шахты

Fig. 1. Equipment for hardening backfill mixture pipeline transport at the back of the mine

Датчик должен срабатывать при образовании закупорки и подавать звуковые или световые сигналы в диспетчерский пункт закладочного комплекса. Емкости *2* и *3* установлены в месте, где давление в закладочном трубопроводе при возникновении закупорки близко к предельному по условиям прочности трубопровода. Число таких емкостей по вертикали зависит от глубины шахты, в которую транспортируют закладочный материал, а также толщины стенок закладочного трубопровода и состава закладочной смеси.

#### **Математическое моделирование прочности закладочного трубопровода.**

Разгрузочно-перегрузочные пункты располагаются вблизи горизонтов с резервной емкостью *б* (рис. 1), длина участка трубопровода между пунктами не

должна превышать некоторую предельную величину  $H_{\text{пр}}$ , ограниченную прочностью трубопровода. Считаем, что пробка из транспортирующей смеси образовалась на конечном участке  $l$  (см. рис. 1) трубопровода. Тогда, принимая, что нагрузка на трубопровод прилагается плавно, давление на трубопровод в радиальном и осевом направлении будет равно

$$\rho_{\text{ст}} = \rho_{\text{ст}} g H_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{см}}$  – плотность закладочной смеси в трубопроводе,  $\text{т/м}^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

Напряжения трубопровода в осевом и радиальном направлениях составят:

$$\sigma_{\text{ос}} = \frac{\rho_{\text{ст}} D_{\text{вн}}^2}{D_{\text{нар}}^2 - D_{\text{вн}}^2}; \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{рад}} = \frac{\rho_{\text{ст}} D_{\text{вн}}}{D_{\text{нар}} - D_{\text{вн}}}, \quad (3)$$

где  $D_{\text{нар}}$  и  $D_{\text{вн}}$  – наружный и внутренний диаметры трубопровода, мм.

Эквивалентная растягивающая нагрузка на участке трубопровода составит

$$\sigma_{\text{эkv}} = \sqrt{\sigma_{\text{ос}}^2 + \sigma_{\text{рад}}^2} \leq [\sigma]. \quad (4)$$

Из выражения (1) с учетом (2)–(4) получим предельное значение длины участка трубопровода между пунктами перегрузки

$$H_{\text{пр}} = \frac{[\sigma]}{\rho_{\text{см}} g \sqrt{\left(\frac{D_{\text{вн}}^2}{D_{\text{нар}}^2 - D_{\text{вн}}^2}\right)^2 + \left(\frac{D_{\text{вн}}}{D_{\text{нар}} - D_{\text{вн}}}\right)^2}}.$$

Для примера рассмотрим параметры смеси и трубопровода: на  $1 \text{ м}^3$  смеси расходуется доменного гранулированного шлака молотого – 400 кг, песка – 1200 кг, воды – 400 л, плотность смеси  $\rho_{\text{см}} = 2,0 \text{ т/м}^3$  (учитывая погрешности дозировки компонентов, можно принять  $\rho = 1,8\text{--}2,2 \text{ т/м}^3$ ), наружный диаметр трубы  $D_{\text{нар}} = 273 \text{ мм}$ , толщина стенки  $\delta = 8 \text{ мм}$  (внутренний диаметр трубы  $D_{\text{вн}} = 257 \text{ мм}$ ).

Принимая  $[\sigma] = 160 \text{ МПа}$ , получим значение максимальной длины трубопровода между узлами перегрузки  $H_{\text{пр}} = 456 \text{ (}415\text{--}508\text{) м}$ . На последнем участке вертикального трубопровода (переходящий в горизонтальный) выбирается длина, обеспечивающая нормальное транспортирование смеси (но не более  $H_{\text{пр}}$ ).

Устройство работает в нормальном и аварийном режимах. При нормальном режиме работы поток твердеющей смеси посредством устройства разделяется на два обособленных участка: поверхность–устройство и устройство–камера, подлежащая закладке на глубоких горизонтах. Уровень заполнения твердеющей смесью на этих участках зависит от сопротивления трубопроводов и особенно их горизонтальных составляющих [12].

При самотечном транспортировании закладочной смеси, когда производят закладку основных камер 8 глубоких горизонтов, в вертикальных трубопроводах (закладочном 1 и магистральном 7) устанавливается определенный уровень заполнения закладочной смесью этих участков и при нормальных условиях работы он поддерживается постоянным. Разрыв потока твердеющей смеси в емкости 3 происходит за счет соединения дополнительной приемной емкости 2 с камерой 6 горизонта 895 м с помощью аварийного трубопровода 5.

Таким образом, давление в верхней части трубопровода 7 второго участка снижается до атмосферного, поскольку воздух, вовлеченный при движении смеси первого участка, выбрасывается из трубопровода 1 в камеру 6 по описанному ранее пути. Тем самым происходит постоянное снижение давления, накопленного на первом участке, до атмосферного, продувание всего участка аварийного трубопровода и контроль работы закладочного процесса.

В случае образования закупорки в закладочном трубопроводе скорость движения смеси снижается и при постоянной производительности закладочного комплекса уровень закладочной смеси в вертикальном участке поднимается. Гидро-смесь, поднимаясь до отводящего трубопровода, переливается в емкость 2, затем в аварийный трубопровод 5 и далее в камеру 6.

Для нормального транспортирования смеси в аварийном трубопроводе длиной горизонтального участка  $l_r$  необходимо, чтобы перегрузочный пункт находился выше горизонта перегрузки на величину  $h_n$  (рис. 1). Аварийный трубопровод выбирается из труб  $D_{вн}$  того же диаметра, что и основной трубопровод. Удельные потери давления, Па/м, на горизонтальном участке закладочного трубопровода определяются из выражения:

$$\Delta p = 26,5 \frac{Q\eta}{D_{вн}^4} + \frac{2\tau_0}{3D_{вн}},$$

где  $Q$  – пропускная способность закладочного (равно производительности закладочного) трубопровода, м<sup>3</sup>/с;  $\tau_0$  – предельное напряжение сдвига смеси, Па;  $\eta = 0,1\sqrt{\tau_0}$  – вязкость закладочной смеси, Па/с.

Давление, создаваемое столбом промывочной воды в вертикальном ставе закладочного трубопровода, Па, определяется как

$$p_c = \rho_b h_n g,$$

где  $\rho_b$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

Высота перегрузки обычно берется с запасом  $k_3 = 1,25-1,35$ . Тогда выражение для определения высоты расположения перегрузочного пункта над горизонтом аварийной разгрузки, при которой обеспечивается очистка трубопровода от твердеющей смеси с помощью воды после ликвидации аварии, будет иметь вид:

$$h_n = k_3 \frac{l_r}{\rho_{см} g} \left( 26,5 \frac{Q\eta}{D_{вн}^4} + \frac{2\tau_0}{3D_{вн}} \right).$$

Для горизонтального участка  $l_r = 200$  м аварийного сброса твердеющей смеси с параметрами: предельное напряжение сдвига  $\tau_0 = 100$  Па; плотность смеси  $\rho_{см} = 2000$  кг/м<sup>3</sup>; производительность комплекса  $Q = 100$  м<sup>3</sup>/ч,  $Q = 0,0278$  м<sup>3</sup>/с; внутренний диаметр трубы  $D_{вн} = 257$  мм; вязкость закладочной смеси  $\eta = 1$ ; плотность воды  $\rho_b = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, превышение пункта аварийной разгрузки над гори-

зонтом будет  $h_{\text{п}} = 11$  м. При ликвидации закупорки посредством вибраторов закладочный комплекс не останавливается, а твердеющая смесь подается по аварийному закладочному трубопроводу в ближайшую камеру б. По мере ликвидации закупорки в магистральном трубопроводе режим подачи закладочной смеси автоматически восстанавливается. Затем через патрубок 8 (рис. 1, узел А) подается вода для промывки аварийного трубопровода.

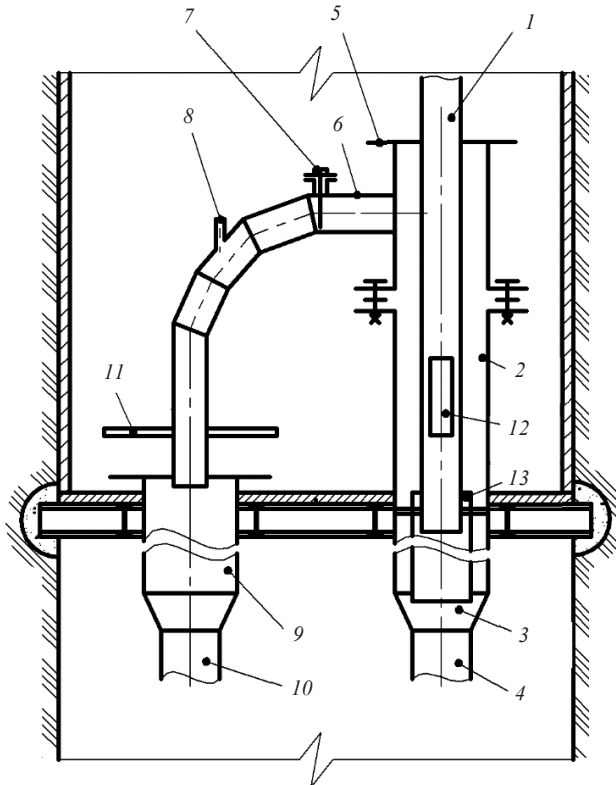


Рис. 2. Общий вид устройства для транспортирования твердеющих закладочных смесей в глубине шахты (продольный разрез)

Fig. 2. General view of the equipment for hardening backfill mixture pipeline transport at the back of the mine (longitudinal section)

Если образовавшуюся закупорку в трубопроводе ликвидируют подачей в него промывочной воды, создавая необходимое давление в трубопроводе 1 для продавливания пробки, отводящий трубопровод отсоединяется от емкости 3 и на его место устанавливается быстроразъемная заглушка. После ликвидации закупорки в магистральном трубопроводе заглушка снимается и подсоединяется отводящий трубопровод, затем подают воду через патрубок 8 (рис. 1, узел А) для промывки аварийного трубопровода.

Во избежание интенсивного засорения отводящего трубопровода при разбрызгивании смеси в месте его соединения с промежуточной емкостью установили предохранительную диафрагму 13 на быстроразъемных фланцах, выполненную из резины толщиной 6–8 мм. При нормальном режиме подачи смеси диафрагма препятствует отводу воздуха в камеру б, поэтому промежуточную емкость 3 в верхней ее части снабдили дополнительным воздухоотводящим трубопроводом диаметром 100 мм и длиной около 60 м.

Другой его конец направили в камеру горизонта 825 м (на схеме не показано). При возникновении закупорки в нижней части магистрального закладочного трубопровода гидросмесь, поднимаясь до отводящего трубопровода, разрывает диафрагму и переливается в аварийный трубопровод. В этом случае перед ликвидацией закупорки устанавливаются заглушки как на отводящем, так и на воздухоотводящем трубопроводах.

Повышение надежности работы установки достигается за счет уменьшения выноса смеси в отводящий трубопровод. Для этого трубопровод, введенный в емкость, снабжен отверстиями, выполненными в виде вертикальных прорезей в стенках трубы и расположенными ниже дополнительного трубопровода (рис. 2). На рис. 2 обозначены: 1 – вертикальный трубопровод; 2, 9 – промежуточные емкости; 3 – конусная часть емкости; 4 – магистральный трубопровод; 5 – колпак; 6 – отводящий трубопровод; 7 – датчик контроля перелива смеси; 8 – промывочный патрубок; 10 – дополнительный трубопровод; 11 – накладка; 12 – отверстия; 13 – перфорированный цилиндрический насадок.

В емкости 2 установлен перфорированный цилиндрический насадок 13 в виде вертикального отрезка трубы, диаметр которого больше диаметра трубопровода 1. При истечении гидросмеси из трубопровода 1 в емкость 3 материал соприкасается со стенками и переливается через отверстия перфорированного насадка, теряет скорость, а следовательно, способность к вихреобразованию. Воздух, вовлеченный при загрузке трубопровода 1, сжимается и через отверстия 12 попадает в емкость 3 выше уровня смеси. По инерции его поток движется навстречу восходящему потоку. Взаимодействие потоков обеспечивает оседание взвешенной смеси, а воздух в дальнейшем движется к трубопроводу 10 и далее в шахтную атмосферу.

Сокращение затрат на устранение закупорки и потери смеси при транспортировании ее в глубокие шахты достигается перекрытием отводящего трубопровода в процессе подачи смеси на период до восстановления нормального режима. Для этого твердеющую закладочную смесь подают в вертикальный участок закладочного трубопровода при открытой запорной арматуре отводящего трубопровода, соединяющего промежуточную емкость с камерой аварийного сброса смеси и с шахтной атмосферой. В промежуточной емкости происходит разрыв потока закладочной смеси, что обеспечивает снижение давления в закладочном трубопроводе и нормальный режим ее транспортирования на вертикальном и горизонтальном участках закладочного трубопровода до выработанного пространства (камеры, обработанные на глубоких горизонтах шахты).

При возникновении закупорки в закладочном трубопроводе запорную арматуру отводящего трубопровода у промежуточной емкости, которая расположена выше закупорки, закрывают. Промежуточная емкость заполняется закладочной смесью, исключается разрыв потока смеси и происходит повышение давления в закладочном трубопроводе. Давление смеси в трубопроводе повышается до величины, позволяющей ликвидировать закупорку трубопровода (продавить пробку). После восстановления нормального режима транспортирования промывают отводящий трубопровод и открывают запорную арматуру. Режим транспортирования смеси восстанавливается автоматически в нормальный.

При двух и более емкостях на вертикальном участке закладочного трубопровода запорной арматурой перекрывают ближайший к закупорке отводящий трубопровод, который расположен выше образовавшейся закупорки.

Эффективность транспортирования твердеющей смеси повышается за счет устранения ее расслоения на горизонтальном участке трубопровода. Для этого перед подачей твердеющей смеси в закладочный трубопровод перекрывают в



нижней части вертикальный став запорной арматуры и запускают оборудование комплекса. Смесь заполняет вертикальный став. После этого задвижку открывают и твердеющая смесь подается в горизонтальный трубопровод полным сечением, где ее движение регулируют перекрытием трубопровода задвижкой, установленной на конце горизонтального участка трубопровода. Величину перекрытия трубопровода данной задвижкой устанавливают с учетом обеспечения условия транспортирования смеси [18]:

$$v_{\min} < v < v_{\max},$$

где  $v$ ,  $v_{\min}$ ,  $v_{\max}$  – скорости смеси, соответствующие установившемуся расчетному режиму транспортирования, нахождению частиц твердого заполнителя на пределе во взвешенном состоянии и максимальному уровню заполнения вертикального става закладочного трубопровода.

Производительность закладочного комплекса к моменту окончания заполнения става соответствует пропускной способности трубопровода. Скорость транспортирования смеси контролируется датчиками, которые подают сигнал на диспетчерский пульт закладочного комплекса или непосредственно на привод задвижек. При нарушении установленного режима транспортирования его восстанавливают путем автоматического (с пульта) открытия или закрытия задвижки, установленной на конце горизонтального участка закладочного трубопровода [19, 20].

**Перспективные направления исследований.** Повышение активности твердеющей смеси в процессе ее транспортирования позволяет вовлечь в производство малоактивные отходы производства, сохранить земную поверхность от разрушения при добыче компонентов смеси и снизить затраты на поверхностное и подземное строительство горных объектов и объектов смежных отраслей [21, 22]. Качество бетонных смесей повышается при рациональном использовании физических и энергетических ресурсов при их транспортировании. Активированная в трубопроводе смесь отличается более равномерным распределением заполнителя, гидратация вяжущих материалов в смеси увеличивается, а прочность смеси существенно возрастает. Применение новой технологии открывает новые возможности использования ресурсосберегающих технологий подземной разработки рудных месторождений с получением многопланового эффекта, в том числе за счет доставки твердеющих закладочных смесей в глубокие шахты.

**Выводы.** Разработаны и внедрены в производство новые устройства УСД-1 для доставки твердеющих закладочных смесей в глубокие шахты, обеспечивающие снижение избыточного давления в трубопроводе, смонтированном в восстающей выработке этажа 895–825 м шахты «Новая–Глубокая», г. Желтые Воды, Украина, т. е. несколько выше критической отметки из условия прочности трубопровода.

Рекомендовано значение максимальной длины трубопровода между узлами перегрузки в пределах 415–508 м, а превышение пункта аварийной разгрузки над горизонтом составляет 11 м. На последнем участке вертикального трубопровода (переходящий в горизонтальный) выбирается длина, обеспечивающая нормальное транспортирование смеси.

Установлена эффективность транспортирования твердеющей закладочной смеси, которая повышается за счет устранения ее расслоения на горизонтальном участке трубопровода при условии  $v_{\min} < v < v_{\max}$ , где  $v$ ,  $v_{\min}$ ,  $v_{\max}$  – скорости смеси, соответствующие установившемуся расчетному режиму транспортирования, нахождению частиц твердого заполнителя на пределе во взвешенном состоянии и максимальному уровню заполнения вертикального става закладочного трубопровода.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Слепцов М. Н., Азимов Р. Ш., Мосинец В. Н. Подземная разработка месторождений цветных и редких металлов. М.: Недра, 1986. 206 с.
2. Ломоносов Г. Г., Полоник П. И., Абдалах Х. Совершенствование технологии очистных работ на основе применения пастообразных закладочных материалов // Горный журнал. 2000. № 2. С. 21–23.
3. Добыча и переработка урановых руд / под общ. ред. А. П. Чернова. Киев: Адеф-Украина, 2001. 238 с.
4. Квитка В. В., Сергеев В. Е., Тротер К., Трезнюк А. П. Твердеющие закладочные смеси повышенной плотности (фирма GMSZ, Австралия) // Горный журнал. 2001. № 5. С. 33–35.
5. Гусев Ю. П., Березиков Е. П., Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н., Шапошник С. Н. Ресурсосберегающие технологии добычи руды на Малеевском руднике Зырянского ГОКа (АО «Казцинк») // Горный журнал. 2008. № 11. С. 20–22.
6. Каплунов Д. Р., Радченко Д. Н. Принципы проектирования и выбор технологий освоения недр, обеспечивающих устойчивое развитие подземных рудников // Горный журнал. 2017. № 11. С. 121–125.
7. Волков Е. П., Анушенков А. Н. Разработка технологии закладки горных выработок твердеющими смесями на основе хвостов обогащения // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 7. С. 5–13 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-5-13
8. Шапошник Ю. Н., Неверов А. А., Неверов С. А., Никольский А. М. Оценка влияния накопившихся пустот на безопасность доработки Артемьевского месторождения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 3. С. 108–118.
9. Ляшенко В. И., Рыбалко В. Я. Совершенствование трубопроводного транспорта закладочных смесей в глубокие шахты // Горный журнал. 1988. № 6. С. 50–53.
10. Ляшенко В. И., Дядечкин Н. И. Совершенствование технологий закладочных работ при подземной разработке урановых месторождений // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 2. С. 9–17.
11. Maanju S. K., Saha K. Impact of mining industry on environmental fabric – a case study of Rajasthan State in India // Journal of Environmental Science. Toxicology and Food Technology. 2013. Vol. 6. Iss. 2. P. 8–13.
12. Chowdhury S. R., Yanful E. K., Pratt A. R. Recycling of nickel smelter slag for arsenic remediation – an experimental study // Environmental Science and Pollution Research. 2014. Vol. 21. P. 10096–10107.
13. Modaihsh A. S., Mahjoub M. O., Nadeem M. E. A., Ghoneim A. M., Al-Barakah F. N. The air quality, characterization of polycyclic aromatic hydrocarbon, organic carbon, and diurnal variation of particulate matter over Riyadh City // Journal of Environmental Protection. 2016. No. 7. P. 1198–1209.
14. Beiyuan J., Awad Y. M., Beckers F., Tsang D. C., Ok Y. S., Rinklebe J. Mobility and phytoavailability of As and Pb in a contaminated soil using pine sawdust biochar under systematic change of redox conditions // Chemosphere. 2017. Vol. 178. P. 110–118. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.03.022
15. Deng D. Q., Liu L., Yao Z. L., Song K. I., and Lao D. Z. A practice of ultra-fine tailings disposal as filling material in a gold mine // J. Environ. Manage. 2017. Vol. 196. P. 100–109.
16. Vrancken C., Longhurst P. J., Wagland S. T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: informing material recovery and fuel production // Waste Management. 2017. Vol. 61. P. 40–57.
17. Cheng Y., Jiang H., Zhang X., Cui J., Song C., Li X. Effects of coal rank on physicochemical properties of coal and on methane adsorption // International Journal of Coal Science & Technology. 2017. Vol. 4. Iss. 2, P. 129–146. DOI: 10.1007/s40789-017-0161-6
18. Ляшенко В. И., Франчук В. П. Повышение эффективности активации компонентов твердеющей закладочной смеси в установках вибрационного трубопроводного транспорта // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 4. С. 92–100.
19. Жирнов А. А., Шапошник Ю. Н., Никольский А. М., Неверов С. А. Геомеханическая оценка горнотехнической ситуации на Иртышском месторождении: обоснование параметров систем разработки // Горный журнал. 2018. № 1. С. 48–53.
20. Basarir H., Bin H., Fourie A., Karrech A. & Elchalakani M. An adaptive neuro fuzzy inference system to model the uniaxial compressive strength of cemented hydraulic backfill // Mining of Mineral Deposits. 2018. No. 12(2). P. 1–12. <https://doi.org/10.15407/mining12.02.001>
21. Sotskov V., Dereviahina N., & Malanchuk L. Analysis of operation parameters of partial backfilling in the context of selective coal mining // Mining of Mineral Deposits. 2019. No. 13(4). P. 129–138. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.129>
22. Iordanov I., Novikova Yu., Simonova Yu., Yefremov O., Podkopayev Ye., & Korol A. Experimental characteristics for deformation properties of backfill mass // Mining of Mineral Deposits. 2020. No. 14(3). P. 119–127. <https://doi.org/10.33271/mining14.03.119>

Поступила в редакцию 5 октября 2020 года

**Сведения об авторах:**

**Ляшенко Василий Иванович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник научно-исследовательского отдела государственного предприятия Украинского научно-исследовательского и проектно-изыскательского института промышленной технологии. E-mail: vilyashenko2017@gmail.com

**Франчук Всеволод Петрович** – доктор технических наук, профессор кафедры инжиниринга и дизайна в машиностроении Национального технического университета «Днепропетровская политехника». E-mail: vpfranchuk@gmail.com

## Improving the efficiency and safety of hardening filling mixtures pipeline transport to deep mines

Vasilii I. Liashenko<sup>1</sup>, Vsevolod P. Franchuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> State Enterprise Ukrainian Research and Design Institute for Industrial Technology, Zhovti Vody, Ukraine.

<sup>2</sup> National Mining University, Dnipro, Ukraine.

### Abstract

**Relevance.** Extraction of mineral raw materials has a negative impact on the natural environment. This effect is neutralized through technologies for mineral extraction using various options for development systems with worked-out spaces filling with hardening filling mixtures of various composition and strength. However, their application is complicated by hardening filling mixtures transportation through the pipeline over considerable distances vertically and horizontally to the point of placement, increased material and labor costs, and a shortage of material for preparing mixtures.

**Research aim** is to improve the efficiency and safety of hardening backfill mixtures pipeline transportation into deep mines by determining the main parameters of hardening backfill mixture pipeline transportation installations (PTI), based on the conditions of its reliable delivery to the point of placement at minimal costs.

**Research methodology** included literature review, the methods of theoretical generalizations using mathematical statistics, physical and mathematical modeling, calculations and feasibility studies, laboratory and field experimental studies, and industrial tests in deep mines using standard and new methods.

**Results.** New USD-1 equipment has been developed and put into production for hardening filling mixtures delivery to deep mines; the equipment ensures overpressure reduction in the pipeline installed in the rise heading of 895–825 m floor in the Novaya-Glubokaya mine, Zheltye Vody, Ukraine.

**Conclusions.** The recommended value of the maximum length of the pipeline between the reloading nodes is within the range of 415–508 m, and the excess of the emergency unloading point above the horizon is 11 m. In the last section of the vertical pipeline (turning into horizontal), a length is selected that ensures normal transportation of the mixture. The efficiency of hardening backfill mixture transportation has been established, which increases due to the elimination of stratification in the horizontal section of the pipeline under the condition of  $v_{\min} < v < v_{\max}$  where  $v$ ,  $v_{\min}$ ,  $v_{\max}$  are mixture velocities corresponding to the steady design mode of transportation, the presence of solid aggregate particles at the limit in the weighted condition and maximum filling level of the filling pipeline vertical column.

**Key words:** deep mines; pipeline transport; overpressure; hardening filling mixtures; efficiency; safety.

**Acknowledgements.** The authors would like to thank the specialists of SE Eastern Mining and Processing Plant (VostGOK), SE UkrSRDIIndechnology (Zhovti Vody, Ukraine), and National Mining University (Dnipro, Ukraine) who took part and assisted with creating, improving and implementing the development. The authors also thank Poddubnyi I. K., Platonov V. N., Riaguzov P. I., Diatchin V. Z., Dudchenko A. Kh., Skoratenko A. G. and others for assistance.

### REFERENCES

1. Sleptsov M. N., Azimov R. Sh., Mosinets V. N. *Underground mining of non-ferrous and rare metals*. Moscow: Nedra Publishing; 1986. (In Russ.)
2. Lomonosov G. G., Polonik P. I., Abdalakh Kh. Improving the technology of stoping based on the use of pasty filling materials. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2000; 2: 21–23. (In Russ.)
3. Chernov A. P. (ed.) *Mining and processing of uranium ores*. Kiev: Adef-Ukraine Publishing; 2001. (In Ukr.)
4. Kvitka V. V., Sergeev V. E., Troter K., Trezniuk A. P. et al. Hardening filling mixtures of increased density (GMSZ firm, Australia). *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2001; 5: 33–35. (In Russ.)
5. Gusev Iu. P., Berezikov E. P., Krupnik L. A., Shaposhnik Iu. N., Shaposhnik S. N. Resource-saving ore mining technologies at the Malevsky mine of Zyrjanovskiy GOK (JSC “Kazzinc”). *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2008; 11: 20–22. (In Russ.)
6. Kaplunov D. R., Radchenko D. N. Principles of design and choice of technologies for the development of subsoil, providing sustainable development of underground mines. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2017; 11: 121–125. (In Russ.)
7. Volkov E. P., Anushenkov A. N. Developing the technology of mine stowing with processing tailings based hardening blends. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 7: 5–13. (In Eng.) Available from: DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-5-13.
8. Shaposhnik Iu. N., Neverov A. A., Neverov S. A., Nikolskii A. M. Assessment of influence of voids on phase II mining safety at artemievsk deposit. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2017; 3: 108–118. (In Russ.)
9. Liashenko V. I., Rybalko V. Ia. Developing filling mixtures pipeline transportation into deep mines. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 1988; 6: 50–53. (In Russ.)

10. Liashenko V. I., Diadechkin N. I. Improvement of technologies of stowing works at underground development of uranium deposits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2011; 2: 9–17. (In Russ.)
11. Maanju S. K., Saha K. Impact of mining industry on environmental fabric – a case study of Rajasthan State in India. *Journal of Environmental Science. Toxicology and Food Technology*. 2013; 6 (2): 8–13.
12. Chowdhury S. R., Yanful E. K., Pratt A. R. Recycling of nickel smelter slag for arsenic remediation – an experimental study. *Environmental Science and Pollution Research*. 2014; 21: 10096–10107.
13. Modaihsh A. S., Mahjoub M. O., Nadeem M. E. A., Ghoneim A. M., Al-Barakah F. N. The air quality, characterization of polycyclic aromatic hydrocarbon, organic carbon, and diurnal variation of particulate matter over Riyadh City. *Journal of Environmental Protection*. 2016; 7: 1198–1209.
14. Beiyuan J., Awad Y. M., Beckers F., Tsang D. C., Ok Y. S., Rinklebe J. Mobility and phytoavailability of As and Pb in a contaminated soil using pine sawdust biochar under systematic change of redox conditions. *Chemosphere*. 2017; 178: 110–118. Available from: DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.03.022.
15. Deng D. Q., Liu L., Yao Z. L., Song K. I., and Lao D. Z. A practice of ultra-fine tailings disposal as filling material in a gold mine. *J. Environ. Manage*. 2017; 196: 100–109.
16. Vrancken C., Longhurst P. J., Wagland S. T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: informing material recovery and fuel production. *Waste Management*. 2017; 61: 40–57.
17. Cheng Y., Jiang H., Zhang X., Cui J., Song C., Li X. Effects of coal rank on physicochemical properties of coal and on methane adsorption. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2017; 4 (2): 129–146. Available from: DOI: 10.1007/s40789-017-0161-6.
18. Liashenko V. I., Franchuk V. P. Hardening stowage mixture components activation efficiency improvement in vibration pipeline transport plants. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2017; 4: 92–100. (In Russ.)
19. Zhirnov A. A., Shaposhnik Iu. N., Nikolskii A. M., Neverov S. A. Geomechanical assessment of the mining situation in the Irtysh deposit, justification of the parameters of development systems. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2018; 1: 48–53. (In Russ.)
20. Basarir H., Bin H., Fourie A., Karrech A. and Elchalakani M. An adaptive neuro fuzzy inference system to model the uniaxial compressive strength of cemented hydraulic backfill. *Mining of Mineral Deposits*. 2018; 12(2): 1–12. Available from: <https://doi.org/10.15407/mining12.02.001>
21. Sotskov V., Dereviahina N., & Malanchuk L. Analysis of operation parameters of partial backfilling in the context of selective coal mining. *Mining of Mineral Deposits*. 2019; 13(4): 129–138. Available from: <https://doi.org/10.33271/mining13.04.129>
22. Iordanov I., Novikova Yu., Simonova Yu., Yefremov O., Podkopayev Ye., and Korol A. *Experimental characteristics for deformation properties of backfill mass*. 2020; 14(3): 119–127. Available from: <https://doi.org/10.33271/mining14.03.119>

Received 5 October 2020

#### Information about authors:

**Vasilii I. Liashenko** – PhD (Engineering), senior researcher, Head of Research Division, State Enterprise Ukrainian Research and Design Institute for Industrial Technology. E-mail: [vilyashenko2017@gmail.com](mailto:vilyashenko2017@gmail.com)  
**Vsevolod P. Franchuk** – DSc (Engineering), Professor, Department of Mining Machines and Complexes, National Mining University. E-mail: [vpfranchuk@gmail.com](mailto:vpfranchuk@gmail.com)

**Для цитирования:** Ляшенко В. И., Франчук В. П. Повышение эффективности и безопасности трубопроводного транспорта твердеющих закладочных смесей в глубокие шахты // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 1. С. 15–26. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-15-26

**For citation:** Liashenko V. I., Franchuk V. P. Improving the efficiency and safety of hardening filling mixtures pipeline transport to deep mines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 1: 15–26 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-15-26