

# РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

## MINING AND MINERAL PROCESSING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 504.55.054:622(470.6)  
DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-1-4-16



### ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРОСАМОТЕЧНОГО ТРАНСПОРТА ТВЕРДЕЮЩИХ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ В ШАХТЫ\*

Ляшенко В.И.<sup>1</sup>, Голик В.И.<sup>2</sup>, Дмитрак Ю.В.<sup>2</sup>, Франчук В.П.<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Северо-Кавказский государственный технологический университет, Владикавказ (РСО-Алания), Россия

<sup>3</sup>Национальный технический университет «Днепровская политехника», Днепр, Украина

**Аннотация.** Постановка задачи (актуальность работы): при подземной разработке месторождений от 40 до 80% образованных техногенных пустот заполняют твердеющими закладочными смесями. В большинстве случаев твердеющие закладочные смеси транспортируют самотеком, возможности которого зависят от соотношения вертикальной и горизонтальной составляющей закладочного трубопровода, а для глубоких рудников и шахт не превышают 1500 м. Используемые методы: теоретических обобщений с применением математической статистики, физическое и математическое моделирование, выполнение расчетов и технико-экономических обоснований, лабораторные и натурные экспериментальные исследования, промышленные испытания в условиях действующих предприятий по стандартным и новым методикам. Новизна: изучены технологии и технические средства для транспортирования твердеющих закладочных смесей и разработан алгоритм расчета схем их трубопроводного транспорта в подземные выработанные пространства, содержащие 0,10–0,35 доли единицы диспергированных частиц с концентрацией твердых частиц в воде 0,10–0,85 доли единицы и осадкой стандартного конуса 10–13 см. Результат: увеличение дальности доставки твердеющих смесей расширяет область применения технологий с закладкой выработанного пространства, сокращает капитальные и эксплуатационные затраты и избавляет от необходимости строительства новых закладочных комплексов с отвлечением значительных площадей земной поверхности. Практическая значимость: изученные нами параметры транспортирования твердеющих смесей в техногенные пустоты на большое расстояние при небольшой глубине горных работ показали, что наиболее перспективным является вибросамотечный транспорт, обеспечивающий гомогенизацию смеси и приращение прочности за счет активации в трубопроводе. Предложен алгоритм расчета параметров трубопроводного транспорта твердеющих закладочных смесей для двух вариантов доставки, который может быть востребован при проектировании технологий разработки месторождений подземным способом.

**Ключевые слова:** подземная разработка, твердеющая смесь, трубопроводный транспорт, параметры транспортирования, математическое моделирование.

© Ляшенко В.И., Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Франчук В.П., 2021

#### Для цитирования

Обоснование параметров вибросамотечного транспорта твердеющих закладочных смесей в шахты / Ляшенко В.И., Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Франчук В.П. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №1. С. 4–16. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-4-16>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

\* В работе принимали участие И.К. Поддубный, В.Н. Платонов, В.З. Дятчин, А.Х. Дудченко, А.Г. Скоратенко и др.  
Acknowledgement: I.K. Poddubny, V.N. Platonov, V.Z. Dyatchin, A.H. Dudchenko, A.G. Skoratenko, etc. took part in work

## RATIONALE FOR THE PARAMETERS OF THE VIBRATION GRAVITY TRANSPORTATION OF SOLIDIFYING FILLING MIXTURES TO MINES

Lyashenko V.I.<sup>1</sup>, Golik V.I.<sup>2</sup>, Dmitrak Yu.V.<sup>2</sup>, Franchuk V.P.<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

<sup>3</sup>Dnipro Polytechnic National Technical University, Dnipro, Ukraine

**Abstract. Problem Statement (relevance of the research):** In underground mining from 40 to 80% of the formed man-made cavities are filled with solidifying filling mixtures. In most cases, such solidifying filling mixtures are transported by gravity, and performance depends on the ratio of vertical and horizontal components of filling pipelines, and for deep-level pits and mines their length do not exceed 1500 m. **Methods Applied:** Methods of theoretical generalizations using mathematical statistics, physical and mathematical simulation, calculations and feasibility studies, laboratory and field experimental studies, industrial tests at operating plants according to conventional and new methods. **Novelty:** The authors studied the technologies and facilities for the transportation of solidifying backfill mixtures and developed an algorithm for calculating diagrams of their pipeline transport to underground mined-out spaces containing 0.10–0.35 decimal quantity of dispersed particles with a concentration of solid particles in water of 0.10–0.85 decimal quantity and a 10–13 cm sediment of a standard cone. **Result:** An increased delivery range of solidifying mixtures expands the field of application of technologies with backfilling of mined-out space, reduces capital and operating costs and eliminates the need for building new filling complexes with the diversion of significant lanplots. **Practical significance:** The authors studied the parameters of transporting solidifying mixtures to man-made cavities over a long distance at a shallow depth of mining and showed that the most promising transportation was vibration gravity transportation ensuring homogenization of the mixture and an increase in strength due to its activation in the pipeline. An algorithm is suggested to calculate the parameters of the pipeline transport of solidifying backfill mixtures for two delivery options. Such algorithm may be useful, when designing underground mining technologies.

**Keywords:** underground mining, solidifying mixture, pipeline transport, transportation parameters, mathematical modeling.

### For citation

Lyashenko V.I., Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Franchuk V.P. Rationale for the Parameters of the Vibration Gravity Transportation of Solidifying Filling Mixtures to Mines. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 1, pp. 4–16. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-4-16>

### Введение

При подземной разработке месторождений от 40 до 80% образованных техногенных пустот заполняют твердеющими закладочными смесями. В большинстве случаев твердеющие закладочные смеси транспортируют самотеком, возможности которого зависят от соотношения вертикальной и горизонтальной составляющей закладочного трубопровода и для глубоких рудников и шахт не превышают 1500 м [1, 2]. При самотечно-пневматическом способе твердеющие закладочные смеси движутся вначале самотеком, а затем доставляются сжатым воздухом к месту их укладки. Оба способа применимы при соотношении вертикальной и горизонтальной частей закладочного трубопровода не менее 1/5 [3, 4]. Поэтому совершенствование технологий и технических средств для транспортирования твердеющих закладочных смесей на основе разработки алгоритма расчета схем их трубопроводного транспорта в подземные выработанные пространства, содержащих 0,10–0,35 доли единиц диспергированных частиц с концентрацией твердых частиц в воде 0,10–0,85 доли единицы и осадкой стандартного конуса 10–13 см, обеспечивающих уменьшение затрат на изготовление и транспортирование твердеющих закладочных смесей, особенно с вовлечением периферийных участков эксплуатируемых месторождений, – важная научная и практическая задача, требующая решения [5, 6].

Для решения поставленных задач были выполнены анализ литературных источников, методов теоретических исследований и обобщений с применением исследования динамики (в зоне резонанса, использовался принцип Вольтерры и понятие о комплексном модуле упругости, введенном Е.С. Сорокиным), математической статистики, физическое и математическое моделирование, расчеты, лабораторные и натурные экспериментальные исследования, промышленные испытания в условиях действующих предприятий по стандартным и новым методикам [7, 8]. Зависимости получены на основе аналитических экспериментальных исследований и опыта

эксплуатации установок трубопроводного транспорта твердеющих смесей в шахты [9, 10].

Для исследования были поставлены следующие задачи:

1. Выполнить математическое и физическое моделирование, а также расчет параметров самотечного и вибросамотечного транспорта твердеющих закладочных смесей.

2. Разработать технические средства для самотечного и вибросамотечного транспорта твердеющих закладочных смесей.

3. Предложить новый комплекс технических средств для активации вяжущего (доменного гранулированного шлака), инертных заполнителей (грохочения некондиционных материалов до требуемого класса крупности) и воды затворения при изготовлении и транспортировании твердеющих закладочных смесей.

### Обсуждение результатов исследований

Установки вибросамотечного транспорта подают твердеющие смеси на расстояние, значительно превышающее высоту вертикального става. На рудниках по добыче урановых руд Тюрингии и Саксонии бывшего Советско-Германского акционерного общества (СГАО) «Висмут» твердеющую смесь с осадкой конуса Строй ЦНИЛ 8,0 см подавали на расстояние, в 3 раза превышающее высоту вертикального става закладочного трубопровода [11, 12]. Установка вибросамотечного транспорта твердеющих закладочных смесей на рудном месторождении Шокпак-Камышовое (Республика Казахстан) включала вертикальный став и горизонтальный трубопровод [13, 14].

Подача твердеющих закладочных смесей осуществлялась порциями объемом до 400 м<sup>3</sup>. К особенностям процесса транспортирования относились сопротивление транспортированию на каскадном участке, использование малоактивных заполнителей с содержанием глины до 50% и активированного в дезинтеграторе жесткого вяжущего доменного гранулированного шлака. Секционированный участок трубопровода был установлен на резиновые амортизационные опоры, а секции трубопровода длиной по 200 м снабжены вибровозбудителями. Под воздействием вибрации смесь приобретала состояние повышенной текучести. Расход энергии на активацию процесса доставки смесей в установке составил 0,15–0,22 кВт/м<sup>3</sup> смеси при подаче на расстояние 2,0 км, частоте колебаний 10–30 Гц и амплитуде 0,5–1,5 мм. Средняя скорость движе-

ния смеси по трубопроводу составила 2,5–3,0 м/с. Смесь транспортировалась без добавки воды при осадке конуса 9 см.

При одинаковом расходе вяжущего в результате вибрации прочность закладочного массива увеличивалась на 20–25%. Вынуждающая сила возбудителя составляла 2–5 кН, амплитуда колебания трубопровода 1,2–2,0 мм, частота колебаний 6–13 Гц. Влияние одного возбудителя воздействовало на участок трубопровода длиной 200–220 м [15, 16].

Самотечный и вибросамотечный трубопроводный транспорт твердеющих закладочных смесей близки по расчету технологических параметров. Преимущество и отличие заключается в том, что при вибросамотечном транспорте обеспечивается уменьшение сопротивления перемещению смеси по трубопроводу и повышается прочность закладки. При этом усложняется конструкция наличием упругих опор и вибровозбудителей, требуется также динамический расчет конструкции [17, 18].

### Расчет параметров самотечного трубопроводного транспорта твердеющих смесей

Диаметр закладочного трубопровода

$$D = 24,45 \cdot V_{cp} \cdot d_c \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\tau_o}}, \quad (1)$$

где  $V_{cp}$  – скорость движения смеси без расслоения, м/с: 0,5–0,7 м/с – при мелком заполнителе, 0,7–1,0 м/с – при крупном заполнителе;  $d_c$  – средняя крупность заполнителя, мм;  $\rho$  – плотность закладочной смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau_o$  – предельное напряжение сдвига смеси, Па.

Пропускная способность закладочного трубопровода, м<sup>3</sup>/с,

$$Q = SV, \quad (2)$$

где  $S$  – поперечное сечение трубопровода, м<sup>2</sup>;  $V$  – скорость движения смеси, м/с.

Удельные потери давления на горизонтальном участке закладочного трубопровода  $\Delta p$ , Па/м, определяются из выражения

$$\Delta p = 26,5 \frac{Q \cdot \eta}{D^4} + \frac{2 \cdot \tau_o}{3 \cdot D}, \quad (3)$$

где  $\eta = 0,1 \cdot \sqrt{\tau_o}$  – вязкость закладочной смеси, Па/с.

Давление, создаваемое столбом смеси в вертикальном ставе закладочного трубопровода  $p_c$ , Па, определяется из выражения

$$p_c = \rho \cdot H_1 \cdot g, \quad (4)$$

где  $H_1 = k_3 \cdot H$  – эквивалентная высота заполнения смесью вертикального става, м (с учетом потерь напора при транспортировании,  $k_3=0,7-0,8$ );  $H$  – высота вертикального става, м (с учетом перепада высот горизонтального участка);  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ .

Максимальная дальность доставки твердеющей закладочной смеси определяется из выражения

$$L = \frac{p_c}{\Delta p} - l_k \cdot n_k, \quad (5)$$

где  $l_k$ ,  $n_k$  – приведенные потери напора в изгибе (колене) и количество колен.

#### *Пример расчета самотечного трубопроводного транспорта закладочных смесей*

*Исходные данные:* предельное напряжение сдвига  $\tau_o = 100 \text{ Па}$ ; средняя крупность заполнителя  $d_c = 2,3 \text{ мм}$ ; плотность смеси  $\rho = 2000 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; производительность комплекса  $Q = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $Q = 0,0278 \text{ м}^3/\text{s}$ ; высота вертикального става  $H = 140 \text{ м}$ ; разница по высоте между началом и концом горизонтального участка трубопровода  $h_o = 12 \text{ м}$ ; количество колен  $n_k = 3$  шт.

*Решение.* Диаметр трубопровода определится из выражения (1):

$$\begin{aligned} D &= 24,45 \cdot V_{cp} \cdot d_c \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\tau_o}} = \\ &= 24,45 \cdot 0,7 \cdot 0,0023 \cdot \sqrt{\frac{2000}{100}} = 0,176 \text{ м}. \end{aligned}$$

Для трубы с наружным диаметром 194 мм и внутренним 174 мм скорость движения твердеющей закладочной смеси определится из выражения (2):

$$V = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 100}{\pi \cdot 0,174^2} = 1,168 \text{ м}/\text{с}.$$

Величина гидростатического давления в начале горизонтального участка трубопровода определится из выражения (4):

$$\begin{aligned} p_c &= \frac{0,7(H - h_0)\rho g}{10^6} = \\ &= \frac{0,7 \cdot (140 - 12) \cdot 2000 \cdot 9,81}{10^6} = 1,758 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

Удельные потери давления на горизонтальном участке трубопровода твердеющей закладочной смеси определяются из выражений (3) и (4):

- вязкость  $\eta = 0,1 \cdot \sqrt{\tau_o} = 0,1 \cdot \sqrt{100} = 1,0$ ;

- удельные потери давления

$$\begin{aligned} \Delta p &= 26,5 \frac{Q \cdot \eta}{D^4} + \frac{2 \cdot \tau_o}{3 \cdot D} = \\ &= 26,5 \frac{0,0278 \cdot 1,0}{0,174^4} + \frac{2 \cdot 100}{3 \cdot 0,174} = 1187 \text{ Па}/\text{м}. \end{aligned}$$

Дальность доставки твердеющей закладочной смеси самотечным трубопроводным транспортом определится из выражения (5):

$$L = \frac{p_c}{\Delta p} - n_k l_k = \frac{1758000}{1187} - 3 \cdot 20 = 1340 \text{ м}.$$

#### **Расчет параметров трубопроводного выбросамотечного транспорта твердеющих смесей**

На трубопровод оказывается вибрационное воздействие знакопеременной силы, которое снижает сопротивление транспортированию, в то время как гидравлический напор или пневматический поток перемещает материал [19]. Основными параметрами вибродоставки являются: длина транспортирования  $L$ , высота вертикального става трубопровода  $H$ , длина секций  $l_1$  и расположение вибровозбудителя в пределах секции  $l_2$ . Воздействие вибрации обеспечивает тиксотропное разжижение дисперсной среды и перемещение частиц смеси, контактирующей со стенками трубопровода. Воздействие вибрации на твердеющую закладочную смесь проявляется путем ускорения колебаний трубопровода, которое характеризуется коэффициентом режима вибротранспортирования

$$\Gamma = \frac{A \cdot \omega^2}{g}, \quad (6)$$

где  $A$  и  $\omega$  – амплитуда и частота колебаний;  $g$  – ускорение земного тяготения,  $\text{м}/\text{с}^2$ .

При  $\Gamma = 0,6-0,9$  создается тиксотропно-разжиженный пристеночный слой и исключается расслоение твердеющей смеси (для смеси, расположенной в емкости, имеющей свободную поверхность, для трубопровода значение  $\Gamma$  можно выбирать несколько больше). Ориентируясь на величину  $\Gamma$  из выражения (6), задаваясь величиной  $A$ , находят частоту вынужденных колебаний  $\omega$  (для инерционных вибровозбудителей с асинхронным приводом или мотор-вибраторов обычно выбирается  $\omega$  и определяется амплитуда  $A$ ). Эффективное воздействие вибрации на смесь обеспечивается при колебании трубопро-

вода с минимальным значением коэффициента режима вибротранспортирования

$$\Gamma_{\min} = \frac{\rho_r - \rho_o}{\rho_r}, \quad (7)$$

где  $\rho_r$ ,  $\rho_o$  – соответственно плотности частиц заполнителя и дисперсной среды, кг/м<sup>3</sup>.

### Расчет технологических параметров трубопровода

Особенностью движения твердеющей закладочной смеси в установках выбросамотечного транспорта является наличие основного потока, в котором сохраняются вязкопластичные свойства смеси, и пристеночного слоя, отличающегося пониженной вязкостью. Расслоение смеси исключается при скорости её продольного движения 0,5–0,7 м/с – для смесей с заполнителем крупностью до 5,0 мм и 0,7–1,0 м/с – для смесей с заполнителем крупностью 5,0–40,0 мм.

Внутренний диаметр трубопровода (минимальный)

$$D_m = 24,45 \cdot V_{cp} \cdot d_{cp} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\tau_o}}, \quad (8)$$

где  $V_{cp}$  – средняя скорость транспортирования, м/с;  $d_{cp}$  – средний размер транспортируемого материала, мм.

Пропускная способность трубопровода (производительность установки), м<sup>3</sup>/с,

$$Q = V \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \quad (9)$$

где  $D$  – внутренний диаметр трубопровода, м;  $V$  – скорость перемещения смеси, м/с.

Наиболее эффективное вибрационное воздействие на твердеющую смесь происходит при скорости её движения  $V=1,0$ –1,5 м/с. Тогда диаметр трубопровода

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot V}} \geq 24,45 \cdot V \cdot d_{cp} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\tau_o}}. \quad (10)$$

Удельные потери давления на горизонтальном участке трубопровода, Па/м,

$$\Delta p = \frac{\frac{158,73}{D^3} + \frac{4 \cdot \tau_o}{D \cdot \eta_l}}{\frac{6}{\eta} + \frac{1}{\eta_l}}, \quad (11)$$

где  $\tau_o$  – напряжение сдвига пристеночного слоя, Па;  $\eta_l$  – вязкость тиксотропно-разжиженного пристенного слоя, Па·с,

$$\eta_l = 0,1 \cdot \sqrt{\tau_o}. \quad (12)$$

Дальность подачи твердеющей смеси установкой

$$L = \frac{P_c}{\Delta p}. \quad (13)$$

### Расчет динамических параметров секции трубопровода

Для обеспечения эффективного воздействия вибрации на твердеющую закладочную смесь необходимо обеспечить горизонтальному участку трубопровода в поперечном направлении параметры вибраций, обеспечивающие требуемый коэффициент вибротранспортирования  $\Gamma$ , величина которого определена по формуле (6). Для этого участок горизонтального трубопровода разбивается на ряд секций, приводимых в движение отдельным вибровозбудителем [20]. Длина секции трубопровода  $l$ , обслуживаемой одним локально установленным вибровозбудителем, выбирается такой, чтобы поперечные колебания трубы на всем ее протяжении находились в пределах  $\Gamma=0,6$ –1,0. Каждая секция установлена на ряд упругих опор, под воздействием вибровозбудителя трубы с заполнителем (твердеющей смесью) совершает изгибные колебания в горизонтальной и вертикальной плоскости (рис. 1).

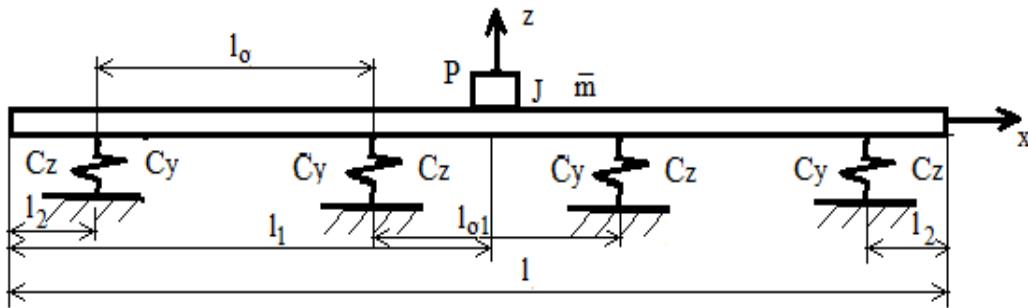


Рис. 1. Расчетная схема для определения изгибных колебаний секции горизонтального трубопровода  
Fig. 1. Design diagram for determining bending vibrations of a horizontal pipeline section

Секция установлена на основание с помощью ряда упругих опор равномерно, сообразно массе элементов секции, расположенных по длине. При этом упругая опора равномерно распределена по длине секции. Рассмотрим секцию как балку со свободными концами, расположенную на упругом основании. Уравнения свободных колебаний по оси  $z$  будут иметь вид

$$EJ \frac{d^4 z}{dx^4} + C_p \cdot z = -\bar{m} \frac{d^2 z}{dt^2},$$

или  $a^2 \left( \frac{d^4 z}{dx^4} + \beta^4 \cdot z \right) = -\left( \frac{d^2 z}{dt^2} \right)$ , (14)

где  $E$  – модуль упругости материала трубы, Па;  
 $J$  – момент инерции сечения секции,  $\text{м}^4$ ,

$$J = \frac{\pi \cdot (D_h^4 - D^4)}{64}; \quad (15)$$

$z$  – перемещение сечения трубы, м;

$\bar{m}$  – распределенная масса секции, кг/м,

$$\bar{m} = \rho_m \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} + \rho_c \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (16)$$

$\rho_m, \rho_c$  – соответственно плотности материала трубы и твердеющей закладки, кг/м<sup>3</sup>;

$a$  – «скорость сечения» при изгибных колебаниях (величина, созвучная со скоростью волны деформации при продольных колебаниях), м<sup>2</sup>/с,

$$a = \sqrt{\frac{EJ}{\bar{m}}}; \quad (17)$$

$\beta$  – параметр, характеризующий упругие опоры,

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{C_p}{E \cdot J}}; \quad (18)$$

$C_p$  – погонная жесткость упругого основания,

$$C_p = \frac{n \cdot C_z}{l}, \quad (19)$$

$C_z$  – жесткость упругой опоры;

$n$  – число опор;

$x$  – координата положения сечения;

$t$  – время протекания процесса изгибных колебаний трубопровода, с.

Рассматривая нормальную форму колебаний,

$$z = Z(x) \cdot (A \sin(pt) + B \cos(pt)). \quad (20)$$

Подставляя (20) в уравнение (14), получим

$$\frac{d^4 Z(x)}{dx^4} + \beta^4 Z(x) = \frac{p^2}{a^2} Z(x). \quad (21)$$

Общее решение уравнения (21) представим в виде

$$\begin{aligned} Z(x) = & C_1 [\cos(kx) + \cosh(kx)] + \\ & + C_2 [\cos(kx) - \cosh(kx)] + \\ & + C_3 [\sin(kx) + \sinh(kx)] + \\ & + C_4 [\sin(kx) - \sinh(kx)], \end{aligned} \quad (22)$$

где коэффициенты  $C_i$  определяются из условий на концах стержня.

В результате подстановки (22) в (21) получим

$$p^2 = a^2 (k^4 + \beta^4). \quad (23)$$

Границные условия для балки со свободными концами имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} 1) \left( \frac{d^2 z}{dx^2} \right)_{x=0} &= 0; \quad 2) \left( \frac{d^3 z}{dx^3} \right)_{x=0} = 0; \\ 3) \left( \frac{d^2 z}{dx^2} \right)_{x=l} &= 0; \quad 4) \left( \frac{d^3 z}{dx^3} \right)_{x=l} = 0. \end{aligned} \quad (24)$$

Подставляя (22) в (23), выясним, что для удовлетворения условий 1 и 2 в (24) нужно, чтобы

$$C_2 = C_4 = 0.$$

Тогда

$$Z(x) = C_1 [\cos(kx) + ch(kx)] + C_3 [\sin(kx) + sh(kx)].$$

Представим это выражение в виде

$$Z(x) = C_1 \left\{ \begin{aligned} & [\cos(kx) + ch(kx)] + \\ & + \frac{C_3}{C_1} [\sin(kx) + sh(kx)] \end{aligned} \right\}. \quad (25)$$

Из зависимостей 3 и 4 в (24) будем иметь

$$\left[ -\cos(kl) + ch(kl) \right] + \frac{C_3}{C_1} \left[ -\sin(kl) + sh(kl) \right] = 0, \quad (26)$$

$$\left[ \sin(kl) + sh(kl) \right] + \frac{C_3}{C_1} \left[ -\cos(kl) + ch(kl) \right] = 0.$$

Чтобы коэффициенты  $C_1, C_3$  имели отличное от нуля значение, необходимо равенство нулю определителя системы уравнений (27), т. е. для получения нетривиального решения системы уравнений (26) необходимо приравнять к нулю определителя:

$$\begin{vmatrix} -\cos(kl) + ch(kl) & -\sin(kl) + sh(kl) \\ +\sin(kl) + sh(kl) & -\cos(kl) + ch(kl) \end{vmatrix} = 0.$$

После преобразований получим частотное уравнение

$$[-\cos(kl) + ch(kl)]^2 - [sh^2(kl) - \sin^2(kl)] = 0.$$

Принимая во внимание, что

$$ch^2(kl) - sh^2(kl) = 1, \cos^2(kl) + \sin^2(kl) = 1,$$

получим

$$\cos(kl) \cdot ch(kl) = 1, \quad (27)$$

отсюда

$$k_0 l = 0, k_1 l = 4,730, k_2 l = 7,853, k_3 l = 10,996, \\ k_4 l = 14,137, k_5 l = 17,279, k_6 l = 20,42, k_7 l = 23,562\dots$$

Складывая зависимости (27), для полученных значений  $k_i l$  будем иметь

$$q(k_i) = \frac{C_3}{C_1} = \frac{\cos(k_i l) - ch(k_i l) - \sin(k_i l) - sh(k_i l)}{-\sin(k_i l) + sh(k_i l) - \cos(k_i l) + ch(k_i l)} = -1.$$

При изучении вынужденных колебаний примем прогиб в виде ряда

$$z(x) = \sum_{i=1,2,3,\dots} \varphi_i \cdot Z(k_i x). \quad (28)$$

Дифференциальное уравнение для  $\varphi_i$  получается при применении принципа виртуальных работ. В результате получим уравнение

$$\ddot{\varphi}_i + p_i^2 \cdot \varphi_i = \frac{2}{\bar{m} \cdot l} Q_i, \quad (29)$$

в котором  $Q_i$  должно быть определено из условия, что  $Q_i \cdot \delta\varphi_i$  представляет виртуальную работу возмущающей силы.

Колебания с собственной частотой  $p_i$  вследствие диссипации энергии со временем затухнут, тогда уравнение, описывающее вынужденные колебания системы, будет иметь вид

$$\varphi_i = \frac{2}{\bar{m} \cdot l \cdot p_i} \int_0^t Q_i \cdot \sin[p_i \cdot (t - t_1)] dt_1. \quad (30)$$

Исследуем систему с распределенными параметрами, когда движение в каждой точке трубопровода зависит не только от времени, но и от координаты положения сечения  $x$  (от номера гармоники колебаний  $k_i$ , длины волны гармоники  $l_1$ ), поэтому  $Z(k_i, l_1)$  определяет форму изги-

ба. В случае, когда на расстоянии  $l_1$  от левого края секции приложена сила

$$P = mor \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t),$$

величина  $Q_i$  будет

$$Q_i = mor \cdot \omega^2 \cdot Z(k_i l_1) \cdot \sin(\omega t). \quad (31)$$

где  $mor$  – кинетостатический момент дебалансных грузов, кг·м;  $Z(k_i l_1)$  – форма изгиба трубы.

В результате, подставляя (31) в (29), будем иметь уравнение

$$\ddot{\varphi}_i + p_i^2 \cdot \varphi_i = \frac{mor \cdot \omega^2}{\bar{m} \cdot l} Z(k_i l_1) \cdot \sin(\omega t).$$

Опуская собственные колебания, вызываемые начальными условиями, рассмотрим только вынужденные колебания, вызванные гармонической силой, тогда

$$\begin{aligned} \varphi_i = & \frac{mor \cdot \omega^2}{\bar{m} \cdot l} Z(k_i l_1) \frac{1}{p_i} \int_0^t \sin(\omega t_1) \times \\ & \times \sin[p_i(t - t_1)] dt_1 = \frac{mor \cdot \omega^2}{\bar{m} \cdot l} \times \\ & \times Z(k_i l_1) \left\{ \frac{1}{(p_i^2 - \omega^2)} \sin(\omega t) - \frac{\omega}{p_i(p_i^2 - \omega^2)} \sin(p_i t) \right\}. \end{aligned} \quad (32)$$

Подставляя это уравнение в ряд (28), получим зависимость для изгибных колебаний секции. Первый ряд, содержащий множитель  $\sin(\omega t)$ , представляет вынужденные колебания.

Свободные колебания с множителем  $\sin(p_i t)$  из-за неупругих сопротивлений со временем затухнут, останутся только вынужденные. То есть для описания колебаний секции будем иметь зависимость

$$z(x) = \frac{mor \cdot \omega^2}{\bar{m} \cdot l} \sin(\omega t) \sum_{i=0,1,2,3,\dots} \frac{Z(k_i x) \cdot Z(k_i l_1)}{p_i^2 - \omega^2}. \quad (33)$$

Выражение (33) справедливо везде, кроме  $\omega = p_i$ . Чтобы исследовать систему и в зоне резонанса, воспользуемся принципом Вольтерры и понятием о комплексном модуле упругости, введенным Е.С. Сорокиным, для чего примем

$$E = E \cdot (1 + j \cdot \lambda L), C_p = C_p \cdot (1 + j \cdot \lambda C), \quad (34)$$

где  $j$  – мнимая единица;  $\lambda L = \frac{\psi L}{2 \cdot \pi}$  и  $\lambda C = \frac{\psi C}{2 \cdot \pi}$  – круговые коэффициенты неупругих сопротивле-

ний,  $\psi L$  и  $\psi C$  – коэффициенты поглощения энергии и параметры движения секции определяются обычным способом.

Конечный результат берется как модуль комплексного числа. Выражение (28) представим в виде

$$z(x) = A(x) \cdot \sin(\omega t), \quad (35)$$

где  $A(x)$  – амплитуда колебаний сечения трубы,

$$A(x) = \frac{mor \cdot \omega^2}{\bar{m} \cdot l} \sum_{i=0,1,2,3,\dots} \frac{Z(k_i x) \cdot Z(k_i l_1)}{p_i^2 - \omega^2}. \quad (36)$$

При расположении вибровозбудителя в центре колебания секции будут симметричными, при этом будут возбуждаться только колебания с нечетными гармониками. Общая картина колебаний секции достаточно большой длины (когда проявляются ее изгибные колебания) при учете семи гармоник (рис. 2). Как следует из графика, в установившемся режиме наибольшую амплитуду отклонения имеет место в середине трубы, к периферии амплитуда колебаний снижается. С учетом массы вибровозбудителя  $m_b$  амплитуда колебаний в центре секции трубы будет

$$A(l_1) = \frac{mor \cdot \omega^2}{\bar{m} \cdot l + m_b} \sum_{i=0,1,2,3,\dots} \frac{[Z(k_i l_1)]^2}{p_i^2 - \omega^2}. \quad (37)$$

При использовании площадных мотор-вибраторов их масса пропорциональна возмущающей силе, т.е.

$$m_b = \frac{k_m}{g} mor \cdot \omega^2, \quad (38)$$

где  $k_m$  – коэффициент пропорциональности;  $mor$  – кинетостатический момент мотор-вибратора;  $g$  – ускорение земного тяготения,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\omega$  – угловая скорость мотор-вибратора рад/с.

По выбранному наибольшему коэффициенту  $\Gamma$  из диапазона  $\Gamma=1-0,6$  и угловой скорости мотор-вибратора  $\omega$  определяем максимальную амплитуду секции (в средней части):

$$A(l_1) = \frac{\Gamma \cdot g}{\omega^2}. \quad (39)$$

Используя выражения (37)–(39), определяем кинетостатический момент мотор-вибратора:

$$mor = \frac{\Gamma \cdot g}{\omega^4} \cdot \frac{\bar{m} \cdot l}{\sum_{i=0}^n \frac{[Z(k_i l_1)]^2}{|p_i^2 - \omega^2|} - \frac{\Gamma \cdot k_m}{\omega^2}}. \quad (40)$$

Для исключения крутильных колебаний трубы на секцию устанавливается по два мотор-вибратора (рис. 3). Тогда определенный по выражению (40) кинетостатический момент нужно распределить на два вибровозбудителя.

Для повышения устойчивости положения трубы на амортизаторах их обычно устанавливают по два в одном узле. Длину секции, обслуживаемой одним вибровозбудителем (парой мотор-вибраторов), выбирают из условия, чтобы на всем протяжении секции интенсивность вибрации находилась в пределах  $\Gamma=1-0,6$ . Амплитуда бегущей волны колебаний трубы в зависимости от удаленности от источника вибрации зависит от частоты вибрации, упругомассовых и диссипативных характеристик системы трубопровода:

$$A(x) = A(l_1) \cdot \exp\left(-\delta_c \frac{|x - l_1|}{\lambda}\right), \quad (41)$$

$\delta_c$  – декремент затухания колебаний;  $\lambda$  – длина волны вынужденных колебаний, м.

Длина волны при изгибных колебаниях трубопровода определяется как

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{E \cdot J}{\bar{m} \cdot \omega^2}}. \quad (42)$$

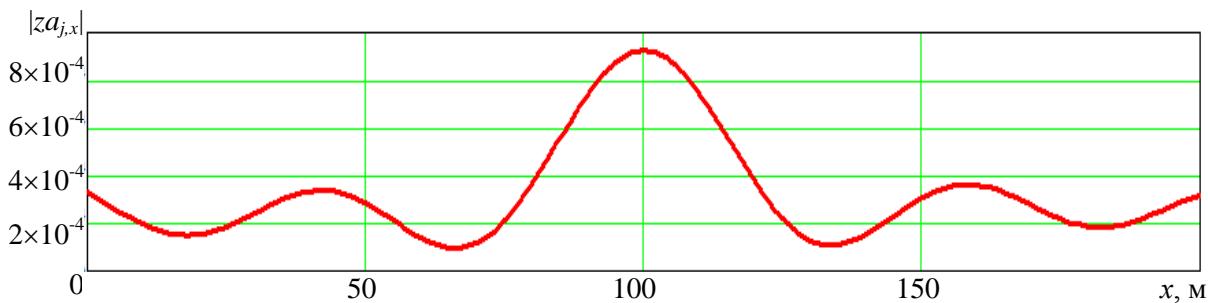


Рис. 2. Изгиб трубы по длине секции  
Fig. 2. Bending of the pipe along the length of the section

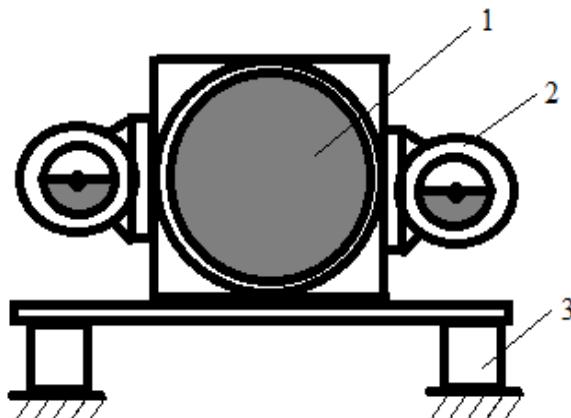


Рис. 3. Секция трубопровода 1 с вибровозбудителями 2 и амортизаторами 3

Fig. 3. Pipeline section 1 with vibration excitors 2 and shock absorbers 3

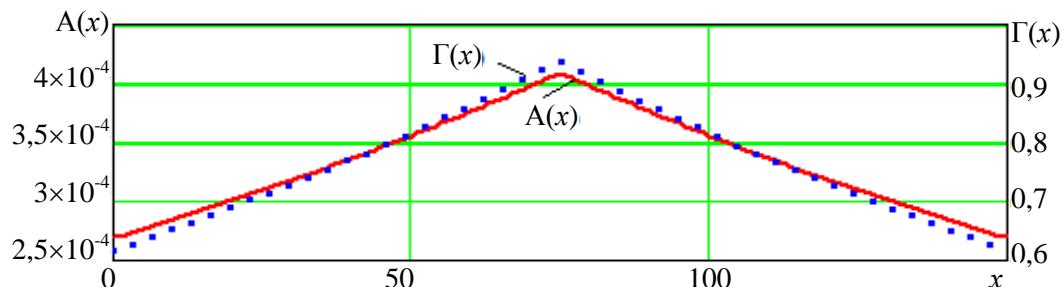
Распределение амплитуд колебаний по длине трубопровода носит экспоненциальный характер (рис. 4). Здесь же представлен и график изменения коэффициента режима колебаний  $\Gamma(x)$ . Как следует из графика, при  $\omega=100$  рад/с режим колебаний секции длиной 200 м вполне приемлем для обеспечения тиксотропного разжижения

закладочной смеси. С увеличением частоты вибрации уменьшается длина волны (в данном случае с  $\lambda=1,54$  м при  $\omega=100$  рад/с до  $\lambda=1,26$  м), соответственно, уменьшается и рациональная длина секции (рис. 4, б), при которой обеспечивается требуемая интенсивность вибрации. В проведенных исследованиях мы постоянно обращались к координате  $z$ , предусматривающей движение в вертикальном направлении.

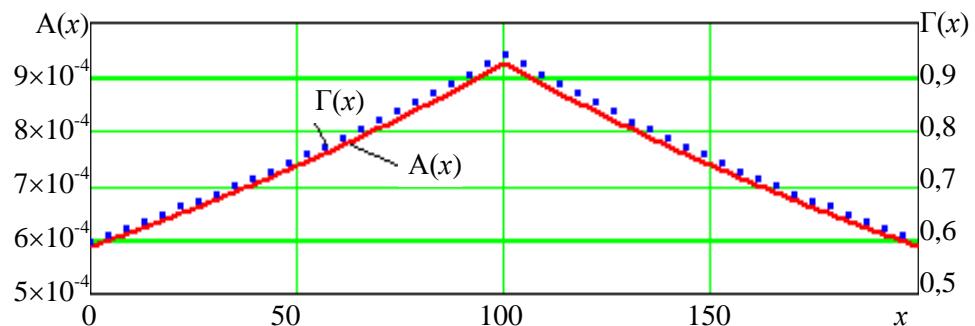
Если иметь в виду, что сила тяжести трубопровода компенсируется силой упругости опорных элементов, то, принимая во внимание расположение приводов (рис. 4, а), все уравнения динамики секции трубопровода пригодны в направлении оси  $y$ , с той лишь разницей, что принимается жесткость опорных амортизаторов, работающих на сдвиг. Учитывая, что упругий амортизатор представляет собой цельный элемент из наполненной резины, можно принять

$$C_y = C_z \frac{1}{2 \cdot (1 + \mu)}, \quad (43)$$

где  $\mu = 0,47-0,49$  – коэффициент Пуассона для резины.



а



б

Рис. 4. Распределение амплитуд колебаний по длине секции при частоте вибратора  $\omega=100$  рад/с (а);  $\omega=150$  рад/с (б)

Результаты расчетов по оси  $y$  будут идентичными, так что траектория трубопровода в плоскости  $yoz$  будет эллиптической, мало отличающейся от круговой. При выборе динамических параметров выбросамотечного транспорта твердеющей смеси вначале выбирается частота колебаний вибровозбудителя  $\omega$ , затем по максимальной ( $\Gamma \approx 1$ ) и минимальной ( $\Gamma \approx 0,6$ ) величине режима транспортирования  $\Gamma$  находится амплитуда колебаний трубопровода в месте установки привода (в середине секции) (выражение (39)), определяются параметры трубопровода по выражениям (15)–(18), параметры изгибных колебаний трубопровода и длину  $l$  секции согласно (41), (42). Затем определяется необходимый кинетостатический момент  $mor$  согласно (40), возмущающее усилие мотор-вибратора  $P_b = mor \cdot \omega^2$  и сам мотор-вибратор.

### Расчет параметров упругих опор

Суммарная жесткость опорных амортизаторов определяется исходя из силы тяжести трубопровода с технологической нагрузкой. Сила тяжести трубопровода

$$P_{tp} = g \cdot (l \cdot \bar{m} + m_b),$$

где  $\bar{m}$  определяется из выражения (19), а  $m_b$  – из каталога оборудования.

Жесткость одного амортизатора, учитывая их попарное расположение в опоре определяется по формуле

$$C_{z1} = 2 \cdot n \frac{P_{tp}}{(1,4 \div 2) \cdot A(l_1)}.$$

Учитывая, что возможен пуск мотор-вибраторов при отсутствии технологической нагрузки, следует выбирать большее значение коэффициента. Высоту упругого элемента выбирают исходя из допускаемой осадки  $[k_h]$  либо по величине допустимой нагрузки  $[\sigma]$ . Обычно выбирается (в зависимости от марки резины)  $[k_h] = 0,1 \div 0,2$ . Учитывая интенсивность вибраций и возможный нагрев элемента, принимаем  $[k_h] = 0,1$ . В результате получим

$$h = (2,4 \div 3)[k_h] \cdot A(l_1).$$

Массивные опорные резиновые элементы изготавливают цилиндрической формы с центральным вентиляционным отверстием. Зная модуль упругости для амортизационной резины  $E_p$ , диаметр упругого элемента определяется как

$$(D - d) = \sqrt{\frac{C_{z1} \cdot h}{\pi \cdot E_p}}.$$

Далее выполняется корректировка размеров упругих элементов и длины секции, проверяется, чтобы они не выходили за рамки допустимых.

### Внедрение результатов исследований

С учетом полученных зависимостей расчет установки выбросамотечного транспорта (УВТ) производили в следующем порядке: определяли частоту и минимальную амплитуду вынужденных колебаний трубопровода, диаметр трубопровода и удельные потери давления, дальность доставки, длину секции и их количество, параметры упругого элемента опоры, их количество, величину вынуждающей силы вибровозбудителя и мощность привода (мотор-вибратора). В соответствии с методикой расчета создана и внедрена в производство УВТ на АО «Целинный горно-химический комбинат», Северный Казахстан [21].

### Направление дальнейших исследований

Актуальность поиска путей совершенствования закладочных работ повышается с увеличением доли подземной добычи при истощении доступных для открытой разработки запасов руд и развитии природоохраных тенденций современности [22]. Вибротранспортирование увеличивает длину доставки твердеющей смеси, что позволяет отказаться от строительства новых комплексов при разработке периферийных участков месторождений [23]. Совершенствование технологии позволяет вовлечь в производство запасы техногенного сырья: хвосты обогащения и малоактивные местные материалы после их подготовки в аппаратах-активаторах [24]. Комплекс инновационных решений позволяет увеличить качество использования недр, сохранить земную поверхность и уменьшить негативное влияние горных работ на окружающую среду [25].

### Выводы

1. Установлено, что использование разработанной конструкции УВТ позволяет: снизить энергоемкость транспортирования до 0,25–0,30 кВт·ч на 1 м<sup>3</sup> смеси; увеличить длину секции трубопровода до 150–200 м, производительность в 1,8–2,0 раза и прочность искусственного массива на 20–25%; обеспечить надежную доставку смесей, осадка стандартного конуса которых составляет 10–13 см, содержащих по массе 0,10–0,35 доли единицы диспергированных частиц и

имеющих концентрацию твердого  $K = 0,80\text{--}0,85$ , на расстояние, в 20 раз превышающее высоту заполнения вертикального става, и полное удаление смеси из трубопровода при расходе воды  $3\text{--}5 \text{ м}^3$  на одну промывку.

2. *Определено*, что рациональная концентрация твердого в твердеющей закладочной смеси составляет  $0,80\text{--}0,85$  доли единицы, вибросамотечный транспорт исключает расслоение смеси в процессе ее транспортирования и позволяет повысить на  $20\text{--}25\%$  прочность искусственного массива.

3. *Обосновано* рациональное соотношение длины секции и частоты вибровозбудителя при

заданных параметрах трубопровода, которое выбирают из условия, чтобы на всем протяжении секции интенсивность вибрации, коэффициент режима вибротранспортирования  $\Gamma$  находился в пределах  $1\text{--}0,6$ .

4. *Показана* эффективность воздействия эллиптических колебаний трубопровода на снижение сопротивления движению твердеющей закладочной смеси. Получено соотношение жесткостей упругих опор в горизонтальной и вертикальной плоскостях, равное  $2\text{--}3$ , при котором достигается эффективная траектория движения трубопровода при круговой вынуждающей силе вибровозбудителя.

#### Список литературы

1. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. М.: Физматгиз, 1959. 439 с.
2. Сорокин Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. М.: Госстройиздат, 1960. 132 с.
3. Горные машины для добычи руд / отв. ред. А.П. Лысов. М.: Недра, 1968. 231 с.
4. Штокман И.Г., Мухопад Н.Д. Транспорт при строительстве подземных сооружений и шахт. М.: Недра, 1970. 232 с.
5. Франчук В.П., Анциферов А.В. Использование принципа Вольтерра и комплексного модуля упругости при учете неупругих сопротивлений в колебательных системах с существенной асимметричной нелинейностью // Науковий вісник НГАУ. № 2. 2000. С. 30–32.
6. Справочник по горнорудному делу / под ред. В.А. Гребенюка, Я.С. Пыжьянова, И.Е. Ерофеева. М.: Недра, 1983. 816 с.
7. Ляшенко В.И., Рыбалко В.Я. Совершенствование трубопроводного транспорта закладочных смесей в глубокие шахты // Горный журнал. 1988. № 6. С. 50–53.
8. Добыча и переработка урановых руд / под общ. ред. А.П. Чернова. Киев: Адеф–Украина, 2001. 238 с.
9. Ляшенко В.И., Голик В.И. Совершенствование технологии и технических средств подземной разработки урановых месторождений // Горный журнал. 2007. №1. С. 11–14.
10. Юдин А. В. Оценка параметров свободных колебаний просеивающей поверхности грохота с консольно защемленными колебаниями // Изв. вузов. Горный журнал. 2016. №5. С. 52–59.
11. Ляшенко В.И., Дятчин В.З., Франчук В.П. Технические средства для добычи и переработки рудных материалов. Сообщение 2 // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 4. С. 33–41.
12. Ляшенко В.И., Франчук В.П. Повышение эффективности активации компонентов твердеющей закладочной смеси в установках вибрационного трубопроводного транспорта // Изв. вузов. Горный журнал. 2017. № 4. С. 92–100.
13. Golik V.I., Razorenov Y.I., Polukhin O.N. Metal extraction from ore benefic和平 cadas by means of lixiviation in a disintegrator // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. T. 10. №17. C. 38105–38109.
14. Разработка технологии закладочных работ на основе цементно-шлакового вяжущего на Орловском руднике / Л.А. Крупник, Ю.Н. Шапошник, С.Н. Шапошник, Г.Т. Нуршайыкова, З.К. Тунгушбаева // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. №1. С. 84–91.
15. Golik V.I., Gabaraev O.Z., Maslennikov S.A., Khasheva Z.M., Shulgaty L.P. The provision of development conversion perspectives into underground one for russian iron ore deposits development // Journal of the Social Sciences. 2016. T. 11. №18. С. 4348–4351.
16. Закладочные смеси на основе отходов обогащения руд в системах подземной разработки месторождений Норильского промышленного района / П.С. Гузанов, А.Э. Лытнева, А.Н. Анушенков, Е.П. Волков // Горный журнал. 2015. № 6. С. 85–88.
17. 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>
18. 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>
19. 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>

20. Сторманенко А.Ю., Анушенков А.Н. Трубопроводный транспорт литых твердеющих закладочных смесей с пониженным водосодержанием // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 2. С. 99–104.
21. 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.
22. Оценка влияния накопившихся пустот на безопасность доработки Артемьевского месторождения / Шапошник Ю.Н., Неверов А.А., Неверов С.А., Никольский А.М. // Физикотехнические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 3. С. 108–118.
23. Волков Е.П., Анушенков А.Н. Разработка технологии закладки горных выработок твердеющими смесями на основе хвостов обогащения // Изв. вузов. Горный журнал. 2019. № 7. С. 5–13 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-5-13
24. Исследование влияния активационной обработки на галитовые отходы обогащения при подготовлении закладочной смеси / Конгар-Сюрюн Ч.Б., Фараджов В.В., Тюляева Ю.С., Хайрутдинов А.М. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 1. С. 43–57. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-43-57.
25. Ляшенко В.И., Франчук В.П. Повышение эффективности и безопасности трубопроводного транспорта твердеющих закладочных смесей в глубокие шахты // Изв. вузов. Горный журнал. 2021. № 1. С. 15–26. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-15-26

### References

1. Timoshenko S.P. *Kolebaniya v inzhenernom dele* [Vibrations in engineering]. Moscow: Fizmatgiz, 1959, 439 p. (In Russ.)
2. Sorokin E.S. *K teorii vnutrennego treniya pri kolebaniyakh uprugikh sistem* [To the theory of internal friction under vibrations of elastic systems]. Moscow: Gosstroizdat, 1960, 132 p. (In Russ.)
3. Lysov A.P. *Gornye maschiny dlya dobychi rud* [Mining machines for ore mining]. Moscow: Nedra, 1968, 231 p. (In Russ.)
4. Shtokman I.G., Mukhopad N.D. *Transport pri stroitelstve podzemnykh sooruzhenii i shakht* [Transportation in the construction of underground structures and mines]. Moscow: Nedra, 1970, 232 p. (In Russ.)
5. Franchuk V.P. Antsiferov A.V. The use of the Volterra principle and the complex modulus of elasticity taking into account non-elastic resistances in oscillatory systems with significant asymmetric nonlinearity. *Naukovy visnik NGAU* [Vestnik of NSAU], 2000, no. 2, pp. 30–32. (In Russ.)
6. Grebenyuk V.A., Pyzhanov Ya.S., Erofeev I.E. *Spravochnik po gornorudnomu delu* [Handbook of mining]. Moscow: Nedra, 1983, 816 p. (In Russ.)
7. Lyashenko V.I., Rybalko V.Ya. Improvement of pipeline transport of filling mixtures to deep mines. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 1988, no. 6, pp. 50–53. (In Russ.)
8. Chernov A.P. *Dobycha i pererabotka uranovykh rud* [Mining and processing of uranium ores]. Kiev: Adef-Ukraina, 2001, 238 p. (In Ukr.)
9. Lyashenko V.I., Golik V.I. Improving the technology and facilities for underground mining of uranium deposits. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2007, no. 1, pp. 11–14. (In Russ.)
10. Yudin A.V. Estimation of free oscillation parameters of the screening surface of the screen with console-restrained oscillations. *Izv. vuzov. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], 2016, no. 5, pp. 52–59. (In Russ.)
11. Lyashenko V.I., Dyatchin V.Z., Franchuk V.P. Technical means for extraction and processing of ore materials. Report 2. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], 2017, no. 4, pp. 33–41. (In Russ.)
12. Lyashenko V.I., Franchuk V.P. Hardening stowage mixture components activation efficiency improvement in vibration pipeline transport plants. *Izv. vuzov. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], 2017, no. 4, pp. 92–100. (In Russ.)
13. Golik V.I., Razorenov Y.I., Polukhin O.N. Metal extraction from ore beneficiation codas by means of lixiviation in a disintegrator. International Journal of Applied Engineering Research. 2015, vol. 10, no. 17, pp. 38105–38109.
14. Krupnik L.A., Shaposhnik Yu.N., Shaposhnik S.N., Nurshayykova G.T., Tungushbaeva Z.K. Development of the stowing operation technology based on a cement-slag binder at the Oryol mine. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physicotechnical Problems of Mining Operations], 2017, no. 1, pp. 84–91. (In Russ.)
15. Golik V.I., Gabaraev O.Z., Maslennikov S.A., Khasheva Z.M., Shulgaty L.P. The provision of development conversion perspectives into underground one for Russian iron ore deposits development. Journal of the Social Sciences, 2016, vol. 11, no. 18, pp. 4348–4351.
16. Guzanov P.S., Lytneva A.E., Anushenkov A.N., Volkov E.P. Stowing mixtures based on ore dressing wastes in underground mining systems of deposits in the Norilsk industrial region. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2015, no. 6, pp. 85–88. (In Russ.)

17. 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), pp. 1–12. <https://doi.org/10.15407/mining12.02.001>
18. 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), pp. 129–138. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.129>
19. 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), pp. 119–127. <https://doi.org/10.33271/mining14.03.119>
20. Stovmanenko A.Yu., Anushenkov A.N. Pipeline transport of cast hardening filling mixtures with low water content. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kuzbass State Technical University], 2016, no. 2, pp. 99–104. (In Russ.)
21. Kaplunov D.R., Radchenko D.N. Principles of design and selection of subsoil development technologies ensuring sustainable development of underground mines. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2017, no. 11, pp. 121–125. (In Russ.)
22. Shaposhnik Yu.N., Neverov A.A., Neverov S.A., Nikolskii A.M. Assessment of influence of voids on phase II mining safety at Artemievsk deposit. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physicotechnical Problems of Mining Operations], 2017, no. 3, pp. 108–118. (In Russ.)
23. Volkov E.P., Anushenkov A.N. Developing the technology of mine stowing with processing tailings based hardening blends. *Izv. vuzov. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], 2019, no. 7, pp. 5–13. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-5-13
24. Kongar-Syuryun Ch.B., Faradzhov V.V., Tyulyaeva Yu.S., Khairutdinov A.M. Effect of activating treatment of halite flotation waste in backfill mixture preparation. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2021, no. 1, pp. 43–57. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-43-57
25. Lyashenko V.I., Franchuk V.P. Improving efficiency and safety of pipelines to transport solidifying filling mixtures to deep mines. *Izv. vuzov. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], 2021, no. 1, pp. 15–26. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-15-26

Поступила 23.11.2020; принята к публикации 08.12.2021; опубликована 12.01.2021  
Submitted 23/11/2020; revised 08/12/2021; published 12/01/2021

**Ляшенко Василий Иванович** – кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела, старший научный сотрудник, Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии, Желтые Воды, Украина. Email: vilyashenko2017@gmail.com

**Голик Владимир Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Горное дело», Северо-Кавказский государственный технологический университет, Владикавказ (РСО–Алания), Россия. Email: v.i.golik@mail.ru

**Дмитрак Юрий Витальевич** – доктор технических наук, профессор, ректор, Северо-Кавказский государственный технологический университет, Владикавказ (РСО–Алания), Россия. Email: dmitrak@yandex.ru

**Франчук Всеволод Петрович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Инжениринг и дизайн в машиностроении», Национальный технический университет «Днепровская политехника», Днепр, Украина. Email: vpfranchuk@gmail.com

**Vasiliy I. Lyashenko** – PhD (Eng.), Head of the Research Department, Senior Researcher, Ukrainian Research and Design Institute for Industrial Technology, Zhovti Vody, Ukraine. Email: vilyashenko2017@gmail.com

**Vladimir I. Golik** – DrSc (Eng.), Professor of the Mining Department, North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: v.i.golik@mail.ru

**Yuriy V. Dmitrak** – DrSc (Eng.), Professor, Rector, North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: dmitrak@yandex.ru

**Vsevolod P. Franchuk** – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Engineering and Design in Mechanical Engineering, Dnipro Polytechnic National Technical University, Dnipro, Ukraine. Email: vpfranchuk@gmail.com