

## **К РАЗРАБОТКЕ СТЕНДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ПЕРЕРАБОТКИ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Евгений Павлович Русин*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, старший научный сотрудник группы прикладной геомеханики, тел. (383) 205-30-30, доп. 332, e-mail: gmmlab@misd.ru

Статья посвящена созданию оригинального лабораторного стенда для моделирования элементов систем переработки сыпучих материалов. В основе стенда – модифицированная абразивоструйная установка. В рассматриваемой версии стенда сменный модуль в виде плоского криволинейного канала имитирует изгиб пневмотранспортного трубопровода. Стенд позволит изучать эрозионный износ таких изгибов.

**Ключевые слова:** пневмотранспорт, трубопровод, колено, эрозионный износ, лабораторный стенд

## **DEVELOPMENT OF A TEST BENCH FOR SIMULATION OF ELEMENTS OF GRANULAR MATERIAL PROCESSING SYSTEMS**

*Evgeny P. Rusin*

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, PhD, Senior Researcher, Applied Geomechanics Group, phone: (383) 205-30-30, ext. 332, e-mail: gmmlab@misd.ru

The paper deals with the development of an original laboratory test bench for modeling elements of granular material processing systems. The core of the test bench is a modified abrasive blasting machine. In this version of the test bench, a changeable module in the form of a flat curved channel imitates an elbow of a pneumatic conveying system. The test bench will allow studying the erosive wear of such elbows.

**Keywords:** pneumatic transport, pipeline, elbow, erosive wear, test bench

### ***Введение***

Термины «зернистый материал» и «зернистая среда» определяют твердый материал в зернистом состоянии, то есть дисперсную систему, состоящую из твердых частиц произвольной формы, находящихся в контакте. В зависимости от наличия и величины сцепления между частицами, зернистый материал может быть либо связным, либо несвязным (свободно текучим) [1]. Степень связности или несвязности продукта в значительной мере определяет подходы к его переработке, применяемое оборудование, технологические режимы. В частности, несвязные среды могут перемещаться таким экономичным видом транспорта как трубопроводный, связные требуют использования механических движителей, таких как шнековые, ленточные конвейеры и т.п. В связи с этим обстоятельством

при решении технических задач, невозможно охватить все многообразие зернистых материалов. Поэтому, рассматривая вопросы их переработки, следует уточнить, о каком именно классе веществ идет речь. В данном исследовании будем рассматривать свободно текущие зернистые материалы, которые обычно называют сыпучими.

Сыпучие материалы составляют существенную долю материалов, перерабатываемых различными отраслями промышленности. Переработка неизбежно сопряжена с транспортом, при этом 80% всего диапазона транспортируемых продуктов – это сыпучие материалы. Значительная их часть перемещается пневмотранспортом, объемы применения которого в мире в последнее время увеличиваются на 6.4% ежегодно благодаря растущему спросу на современные и энергоэффективные системы пневматической транспортировки [2]. Обусловлено это их преимуществами перед другими видами транспортного оборудования [3]:

- 1) возможность перемещать материал в горизонтальном, наклонном и вертикальном направлениях;
- 2) удобство монтажа в стесненных условиях, так как материал перемещается по трубопроводу небольшого диаметра, который можно проложить с учетом местных условий, например, в траншее, на столбах и т. п.;
- 3) возможность совмещения некоторых технологических функций с транспортированием;
- 4) высокая степень автоматизации процесса транспортирования и распределения материала по бункерам и легкость управления этими процессами;
- 5) возможность подачи материала одновременно из нескольких пунктов погрузки к нескольким пунктам выгрузки;
- 6) широкие диапазоны производительностей и расстояний транспортирования; в отдельных случаях производительность пневматических транспортных установок достигает до 300 т/ч, а дальность транспортирования до 2 км;
- 7) сравнительно невысокие капитальные затраты на оборудование и сооружение установок;
- 8) хорошие санитарно-гигиенические условия труда обслуживающего персонала, защищенность окружающей среды;
- 9) отсутствие потерь груза;
- 10) высокая надежность.

В горном деле основное применение пневмотранспорт находит в закладочных комплексах, предназначенных для закладки породой и иными закладочными материалами выработанного пространства на шахтах и рудниках (как действующих, так и заброшенных) в целях управления горным давлением и предотвращения просадок дневной поверхности [4-15].

Доля пневматической закладки в общем объеме закладочных работ в значительной мере зависит от истории и уровня развития техники горного дела в конкретном регионе. В частности, благодаря высокому уровню механизации и автоматизации подземных горных работ, последние 30 лет пневматическая закладка доминировала в угольной промышленности Германии [10]. В то же время, в китайских угольных шахтах преобладает гидравлический вариант этой технологии.

Поскольку пневмозакладка преимуществ по несущей способности формируемого закладочного массива не даёт, то в Китае ее применяют весьма редко и только в тех случаях, когда водные ресурсы недостаточны или дополнительное обводнение нежелательно [12].

В России в 1990-е годы пневматическая закладка применялась весьма интенсивно, в частности, на предприятиях Минуглепрома СССР [14]. В современной России она используется наряду с гидравлической [5].

Практикой подтверждена эффективность применения пневмотранспорта также для перемещения угля, концентратов руд, горно-химического сырья, глинозема, ВВ, зол ТЭЦ, формовочных смесей и др. [4-8, 16].

Специфика пневмотранспортных систем такова, что их взаимодействующие с перемещаемыми продуктами узлы и детали (трубопроводы и их изгибы, фитинги, отклоняющие устройства и др.) подвергаются интенсивному эрозионному износу. Опыт показывает, что закладочный трубопровод из стали Ст. 3 с толщиной стенки 8 мм полностью изнашивается при пропуске 10-12 тыс. тонн породы, поэтому ежегодная потребность в трубах из малоуглеродистой стали для пневмозакладки составляет десятки километров [14].

Наиболее быстро изнашивающимися частями пневмотранспортных трубопроводов являются их изгибы (колена) [3, 15, 16, 17]. При высокой абразивности перемещаемого продукта эти элементы могут приходить в негодность в течение всего лишь нескольких часов [16], поэтому повышение их долговечности является весьма насущной задачей. Исследования в этой области ведутся достаточно давно, экспериментальным и численно-экспериментальным исследованиям, направленным на снижение/предотвращение износа компонентов пневмотранспортных систем, посвящены работы [16-25]. Однако, универсального и эффективного решения обсуждаемой проблемы до настоящего времени не предложено и она продолжает оставаться актуальной. В основе ее решения должно быть изучение механики взаимодействия частиц, транспортируемых потоком воздуха, с указанными элементами.

Для проведения такого исследования и выявления принципиальных аспектов и закономерностей процесса была поставлена задача разработки и изготовления лабораторного стенда для физического моделирования такого взаимодействия.

### ***Модель элемента пневмотранспортной системы***

В разрабатываемом стенде в качестве исследуемого элемента используется модель колена трубопровода (рис. 1). Модель представляет собой пластину 1 с фигурным вырезом (каналом) 2, образующим изгиб трубопровода. Для удобства наблюдения за процессом пневмотранспортирования частиц и сравнения экспериментальных результатов с результатами численного моделирования в плоской постановке канал 2 выполнен прямоугольного сечения. Лицевая 3 и задняя (на иллюстрации не видна) стенки модели выполнены из прозрачного стекла. Канал 2 со стороны задней стенки закрыт светорассеивающим материалом для обеспе-

чения в случае необходимости равномерной подсветки рабочего пространства. Для визуализации следов взаимодействия транспортируемых частиц с боковыми поверхностями канала 2 они футерованы глянцевой непрозрачной пленкой. Сыпучий материал подаётся в модель по подающему патрубку 4 и выпускается по разгрузочному трубопроводу 5.

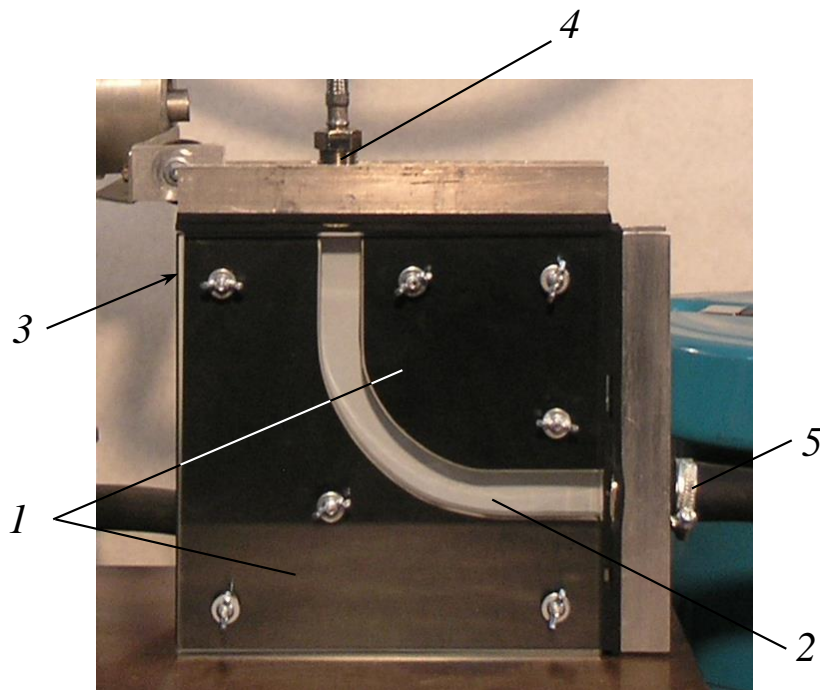


Рис. 1. Модель колена пневмотранспортного трубопровода.  
Пояснения в тексте

В качестве модельного сыпучего материала в стенде предполагается использовать сухой песок фракции 0.5 мм. Для обеспечения беспрепятственного прохода частиц по каналу 2 и надежной фотофиксации картин их перемещения размеры его поперечного сечения выбраны как 16 (глубина) x 25 (ширина) мм. Данная модель в стенде может быть заменена узлом, моделирующим какой-либо другой исследуемый элемент. Возможно использование в стенде иных сыпучих материалов (рудной крошки, стальной дроби и др.).

### ***Компоновка стенда***

В [24, 25] сделано обобщение о том, что установки для исследования пневмотранспортных систем традиционно включают пять основных узлов: узел подачи сжатого воздуха, бункер-накопитель, податчик сыпучего материала, трубопровод, узел разгрузки материала. Работы [17, 21-24] посвящены решению задач близких к теме настоящего исследования, состав используемых в них исследовательских стендов примерно одинаков. Примером такого стенда может служить

испытательная установка, использованная авторами [24] для изучения износа изгибов пневмотранспортных трубопроводов.

Поставленная в настоящем исследовании задача предполагает уход от крупногабаритных компонентов и максимальное использование элементов имеющейся инфраструктуры и лабораторного оснащения. Поэтому состав разрабатываемого стенда (рис. 2) отличен от состава таковых, использованных авторами [21-24]. В целях упрощения конструкции лабораторной установки принят модульный принцип её построения. А именно, для приготовления воздушно-песчаной смеси использовано готовое комплексное решение – установка абразивоструйная Zitrek И-М-30 [26] (на рис. 2 поз. 1), характеристики которой приведены в табл. 1. Установка имеет весьма широкий диапазон регулирования подачи воздушно-песчаной смеси и включает бункер-накопитель 2, узел приема сыпучего материала 3, дозатор 4 с регулировочной втулкой 5, смеситель 6, в котором формируется песчано-воздушная струя, рукав 7 подвода сыпучего материала к смесителю 6, рукав 8 подвода воздуха к смесителю 6, кран 9 для включения и выключения подачи смеси. Из смесителя 6 смесь поступает в модель 10 колена трубопровода (см. рис. 1 и описание выше), а далее в приемный бункер 11 с фильтром (фильтр на рисунке не показан) для подавления пыли. Сжатый воздух подается в стенд по магистральному рукаву 12 от стационарной системы, включающей компрессор, ресивер и другие необходимые элементы (на иллюстрации не показаны). Для фотофиксации изучаемого процесса используются стандартные средства фотосъемки: цифровая фотокамера, осветительная аппаратура и др.

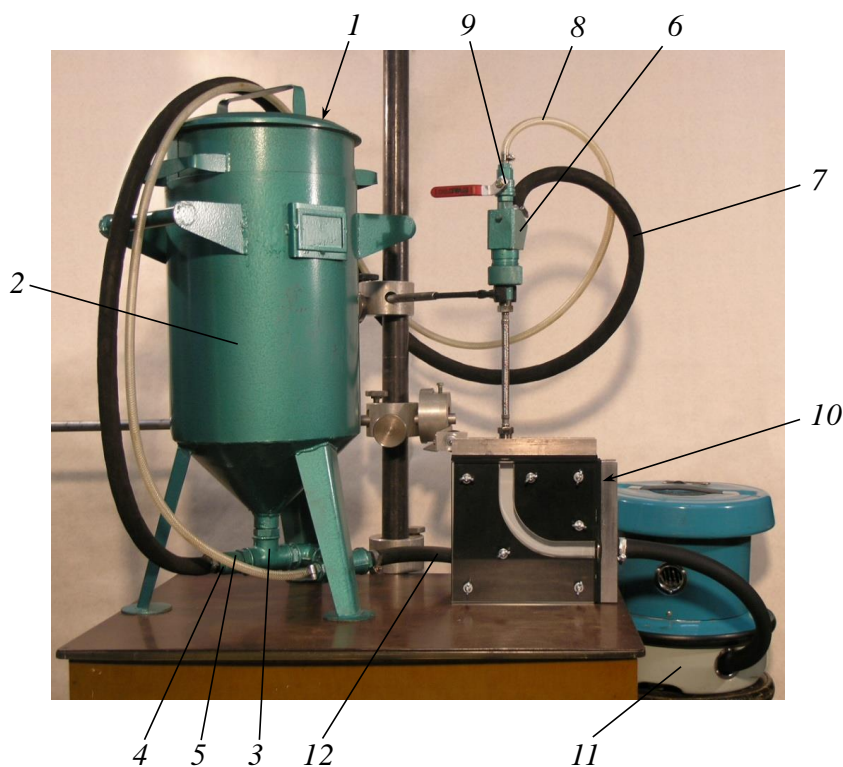


Рис. 2. Стенд для моделирования элементов систем переработки зернистых материалов

Предварительные испытания показали работоспособность отдельных компонентов стенда. Экспериментальные исследования эрозионного износа изгиба пневмотранспортного трубопровода и средств защиты от эрозионного износа проведены в 2020 г. и будут являться предметом отдельной публикации.

Таблица 1

Основные технические характеристики установки Zitrek И-М-30

Наименование параметра	Норма
1. Габаритные размеры, мм	850x485
2. Масса, кг	25
3. Объем ёмкости, л	30
4. Рабочее давление, кгс/см <sup>2</sup>	3-6
5. Расход сжатого воздуха, м <sup>3</sup> /мин.	0,2-1,2
6. Производительность м <sup>2</sup> /час	0,5-3
7. Абразивный материал	без ограничения

Предварительные испытания показали работоспособность отдельных компонентов стенда. Экспериментальные исследования модели изгиба трубопровода запланированы на 2020 г. и будут являться предметом отдельной публикации.

### Заключение

Таким образом, с учетом опыта создания стендов для экспериментальных исследований пневмотранспортных систем разработан и изготовлен стенд для моделирования элементов таких систем. Стенд построен по модульному принципу, в его основе – модифицированная абразивоструйная установка. В рассматриваемой версии стенда встроены сменный модуль в виде плоского криволинейного канала. Модуль имитирует изгиб пневмотранспортного трубопровода и позволяет изучать эрозионный износ таких изгибов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке проекта НИР FWNZ-2021-0003.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Першина С.В., Катыльмов А.В., Однолько В.Г., Першин В.Ф. Весовое дозирование зернистых материалов. – М.: Машиностроение, 2009. – 260 с.
2. Markets and Markets Research Private Ltd. Pneumatic Conveying Systems Market - Global Forecast 2022. – 2017. – [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/pneumatic-conveying-systems-market-7630455.html> (Дата обращения: 10.12.2019).
3. Каримов И. Гидравлический и пневматический транспорт. – [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.detalmach.ru/lect31.htm> (Дата обращения: 10.12.2019).
4. Смолдырев А.Е. Гидравлический и пневматический транспорт в металлургии и горном деле. – М.: Металлургия, 1967. – 357 с.

5. Горная энциклопедия. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.mining-enc.ru> (Дата обращения: 10.12.2019).
6. Dyni, R.C. An instrumented pneumatic backfilling system. – Bureau of Mines, United States Department of the Interior. – Report of investigations 9485. – 1993. – 14 p.
7. Dyni, R.C. and Burnett, M. Speedy backfilling for old mines // *Civil Engineering*. – 1993. – Vol. 63. – No. 9. – Pp. 56-58.
8. Burnett, J.M, Burnett, M., Ziemkiewicz, P., Black, D.C. Pneumatic backfilling of coal combustion residues in underground mines. – Hynes, T.P., Blanchette, M.C. [Eds.] *Proceedings of Sudbury`95: Mining and the Environment, Sudbury (Canada), 23 May - 1 June 1995*. – 1995. – Pp. 1211-1220.
9. Chugh, Y. P., De, I., & Powell, E.. A model study for blind pneumatic backfilling of fly ash in abandoned underground mines // *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. – 2005. – 19(4), 295–311. DOI: 10.1080/13895260500157954
10. Junker, M., Witthaus, H. Progress in the research and application of coal mining with stowing // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2013. – 23(1), 7–12. DOI: 10.1016/j.ijmst.2013.01.002.
11. Gupta, A.K., Paul, B. A review on utilisation of coal mine overburden dump waste as underground mine filling material: a sustainable approach of mining // *Int. J. Mining and Mineral Engineering*, Vol. 6, No. 2, 2015. – Pp. 172-186. DOI: 10.1504/IJMME.2015.070380.
12. Chen, S., Yin, D., Cao, F., Liu, Y., Ren, K. An overview of integrated surface subsidence-reducing technology in mining areas of China // *Natural Hazards*. – 2015. – 81(2), 1129–1145. DOI:10.1007/s11069-015-2123-x.
13. Valgma, I. et al. Backfilling technologies for Estonian oil shale mines. – *Proceedings of the 6th International Conference on Sustainable Development in the Minerals Industry, 30 June – 3 July 2013, Milos island, Greece*. – Pp. 374-378.
14. Куликов Н.В., Шумихин Е.В. Применение труб из нетрадиционных материалов в гидро- и пневмозакладочных трубопроводах // *Горный журнал*. – 1991. – № 10. – С. 59-60.
15. Битимбаев М.Ж., Крупник Л.А., Шапошник Ю.Н. Теория и практика закладочных работ при разработке месторождений полезных ископаемых. – Алматы, Казахстан: Ассоциация высших учебных заведений РК. – 2012. – 624 с.
16. Mills D., Jones, M.G., Agarwal, V.K. *Handbook of Pneumatic Conveying Engineering*. – New York: Marcel Dekker, Inc., 2004. – 720 p.
17. Kesana et al. Ultrasonic measurement of multiphase flow erosion patterns in a standard elbow // *J Energy Res Technol*, 2013. – 135(3):32905. <https://doi.org/10.1115/1.4023331/> .
18. Mills, D., Mason, J.S. Particle size effects in bend erosion // *Wear*, 1977. – 44(2):311–328. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(77\)90147-8](https://doi.org/10.1016/0043-1648(77)90147-8) .
19. Weinberger, C.B., Shu, M.T. Helical gas-solids flow II. Effect of bend radius and solids flow rate on transition velocity // *Powder Technol.* – 1986. - 48(1):19–22. DOI: 10.1016/0032-5910(86)80060-2.
20. Mekhail TA, Aissa WA, Hassanein SA, Hamdy O (2011) CFD simulation of dilute gas–solid flow in 90° square bend // *Energy Power Eng* 3(3):246–252. <https://doi.org/10.4236/epe.2011.33031>.
21. Suhane, A., Agarwal, V.K. Effect of bend geometry on erosion and product degradation in pneumatic conveying pipeline systems // *Int J Eng Res Appl*. – 2012. – 2(4):129–136.
22. Hongjun Zhu, Shuai Li. Numerical analysis of mitigating elbow erosion with a rib // *Powder Technology* 330 (2018) 445–460. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.046> .
23. Jun Yao, Benzhaoh Zhang, Jianren Fan. An experimental investigation of a new method for protecting bends from erosion in gas-particle flows // *Wear* 240 \_2000. 215–222
24. Verma, R., Agarwal, V.K., Pandey, R.K., Gupta, P. Erosive wear reduction for safe and reliable pneumatic conveying systems: review and future directions // *Life Cycle Reliability and Safety Engineering*. – Vol. 7. – No. 3. –2018. – Pp. 193-214. – DOI 10.1007/s41872-018-0055-7.

25. Burdine, N. Design of a pneumatic conveying test loop for laboratory testing. – USA, TN, Chattanooga: University of Tennessee at Chattanooga, 2018. – 83 p.
26. Установка абразивоструйная эжекторного типа Zitrek И-М-30. Паспорт. – Великие Луки: ООО ПневмоСтройТехника [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.vlpst.ru> (Дата обращения: 10.12.2019).

## REFERENCES

1. Pershina, S.V., Katalymov, A.V., Odnolko, V.G., Pershin, V.F. (2009) Weight dosing of granular materials. [Vesovoe dozirovanie zernistykh materialov]. Moscow: Mashinostroenie. – 260 p. [In Russian].
2. Markets and Markets Research Private Ltd. (2019, December 10) Pneumatic Conveying Systems Market - Global Forecast 2022. – Retrieved from <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/pneumatic-conveying-systems-market-7630455.html>
3. Karimov, I. (2019, December 10) Hydraulic and pneumatic transport. [Gidravlicheskiy i pnevmaticheskij transport]. Retrieved from <http://www.detalmach.ru/lect31.htm> . [In Russian].
4. Smoldyrev, A.E. (1967) Hydraulic and pneumatic transport in metallurgy and mining. [Gidravlicheskiy i pnevmaticheskij transport v metallurgii i gornom dele]. M.: Metallurgy, [Metallurgiya], 357 p. [In Russian].
5. Mining encyclopedia. (2019, December 10). [Gornaya enciklopediya]. Retrieved from <http://www.mining-enc.ru>. [In Russian].
6. Dyni, R.C. (1993) An instrumented pneumatic backfilling system. Bureau of Mines, United States Department of the Interior. Report of investigations 9485, 14 p.
7. Dyni, R.C. and Burnett, M. (1993) Speedy backfilling for old mines. Civil Engineering, 63(9), 56-58.
8. Burnett, J.M, Burnett, M., Ziemkiewicz, P., Black, D.C. (1995) Pneumatic backfilling of coal combustion residues in underground mines. Hynes, T.P., Blanchette, M.C., eds. Proceedings of Sudbury`95: Mining and the Environment, Sudbury (Canada), 23 May - 1 June 1995, 1211-1220.
9. Chugh, Y. P., De, I., & Powell, E. (2005) A model study for blind pneumatic backfilling of fly ash in abandoned underground mines. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 19(4), 295–311. DOI: 10.1080/13895260500157954
10. Junker, M., Witthaus, H. (2013) Progress in the research and application of coal mining with stowing. International Journal of Mining Science and Technology, 23(1), 7–12. DOI: 10.1016/j.ijmst.2013.01.002.
11. Gupta, A.K., Paul, B. (2015) A review on utilisation of coal mine overburden dump waste as underground mine filling material: a sustainable approach of mining. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 6(2), 172-186. DOI: 10.1504/IJMME.2015.070380.
12. Chen, S., Yin, D., Cao, F., Liu, Y., Ren, K. (2015) An overview of integrated surface subsidence-reducing technology in mining areas of China. Natural Hazards, 81(2), 1129–1145. DOI:10.1007/s11069-015-2123-x.
13. Valgma, I. et al. (2013) Backfilling technologies for Estonian oil shale mines. – Proceedings of the 6th International Conference on Sustainable Development in the Minerals Industry, 30 June – 3 July 2013, Milos island, Greece, 374-378.
14. Kulikov, N.V., Shumikhin, E.V. (1991) Application of pipes made of unconventional materials in hydraulic and pneumatic backfilling pipelines [Primenenie trub iz netradicionnykh materialov v gidro- i pnevmozakladochnykh truboprovodakh]. Mining journal [Gornyj zhurnal], No. 10, 59-60. [In Russian].
15. Bitimbaev, M.Zh., Krupnik, L.A., Shaposhnik, Yu.N. (2012) Theory and practice of backfilling operations in the development of mineral deposits. [Teoriya i praktika zakladochnykh rabot pri razrabotke mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh]. Almaty, Kazakhstan: Association of Higher Educational Institutions of the Republic of Kazakhstan [Assotsiatsiya vysshikh uchebnykh zavedenij RK], 624 p.



16. Mills, D., Jones, M.G., Agarwal, V.K. (2004) Handbook of Pneumatic Conveying Engineering. New York: Marcel Dekker, Inc., 720 p.
17. Kesana et al. (2013) Ultrasonic measurement of multiphase flow erosion patterns in a standard elbow. Journal of Energy Resource Technology, 135(3):32905. <https://doi.org/10.1115/1.4023331/>.
18. Mills, D., Mason, J.S. (1977) Particle size effects in bend erosion. Wear, 44(2):311–328. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(77\)90147-8](https://doi.org/10.1016/0043-1648(77)90147-8).
19. Weinberger, C.B., Shu, M.T. (1986) Helical gas-solids flow II. Effect of bend radius and solids flow rate on transition velocity. Powder Technology, 48(1):19–22. DOI: 10.1016/0032-5910(86)80060-2.
20. Mekhail, T.A., Aissa W.A., Hassanein, S.A, Hamdy, O. (2011) CFD simulation of dilute gas–solid flow in 90° square bend. Energy Power Engineering, 3(3):246–252. <https://doi.org/10.4236/epe.2011.33031>.
21. Suhane, A., Agarwal, V.K. (2012) Effect of bend geometry on erosion and product degradation in pneumatic conveying pipeline systems. International Journal of Engineering Research and Applications, 2(4):129–136.
22. Zhu, H., Li, S. (2018) Numerical analysis of mitigating elbow erosion with a rib. Powder Technology, 330, 445–460. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.046>.
23. Yao, J., Zhang, B., Fan, J. (2000) An experimental investigation of a new method for protecting bends from erosion in gas-particle flows. Wear, 240, 215–222.
24. Verma, R., Agarwal, V.K., Pandey, R.K., Gupta, P. (2018) Erosive wear reduction for safe and reliable pneumatic conveying systems: review and future directions. Life Cycle Reliability and Safety Engineering, 7(3), 193-214. – DOI 10.1007/s41872-018-0055-7.
25. Burdine, N. (2018) Design of a pneumatic conveying test loop for laboratory testing. USA, TN, Chattanooga: University of Tennessee at Chattanooga, 83 p.
26. PnevmoStroyTechnika, LLC. (2019, December 12) Abrasive blasting unit of the ejector type Zitrek I-M-30. Passport. [Ustanovka abrazivostrujnaya ezhektornogo tipa Zitrek I-M-30. Passport]. – Velikiye Luki: PnevmoStroyTechnika, LLC. Retrieved from: <http://www.vlpst.ru>.

© E. П. Русин, 2021