

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

К.Е. Демихов

А.А. Очков

В.М. Скорняков

ked@bmstu.ru

aochkov@bmstu.ru

skornyakov@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Проанализировано современное состояние систем пневматической транспортировки сыпучих материалов. Рассмотрены четыре ключевые проблемы, влияющие на эффективность подобных систем: 1) абразивный износ элементов системы, 2) образование завалов материала в трубопроводах, 3) низкая энергетическая эффективность, 4) деградация транспортируемого материала. Установлено, что интенсивность абразивного износа определяется скоростью транспортирующего потока газа и массовой концентрацией транспортируемого материала. Показано, что образование завалов обусловлено уменьшением скорости потока ниже минимально необходимых значений, изменением свойств транспортируемого материала и нестабильностью работы системы. Приведены закономерности изменения потерь давления в зависимости от скорости воздушного потока и массовой концентрации материала. Систематизированы методы и перспективные технологии повышения эффективности систем пневматической транспортировки: переход на режим транспортировки в плотной фазе, применение износостойких материалов и специальных конструктивных элементов, использование ступенчатых систем с переменным диаметром трубопровода, внедрение систем мониторинга неисправностей и автоматического управления параметрами рабочего процесса. Результаты проведенного исследования могут быть использованы при проектировании, эксплуатации и модернизации промышленных систем пневматической транспортировки сыпучих материалов

Ключевые слова

Пневматическая транспортировка, сыпучие материалы, повышение эффективности, энергетическая эффективность, перспективы развития, оптимизация параметров

Поступила 01.12.2025

Принята 09.02.2026

© Автор(ы), 2026

Введение. Системы пневматической транспортировки сыпучих материалов предназначены для перемещения дисперсных твердых материалов по трубопроводам с помощью потока воздуха или иного газа в качестве несущей среды [1–3]. Такие системы широко применяются в химической, фармацевтической, пищевой, горнодобывающей и других отраслях промышленности за счет ряда преимуществ, таких как высокая массовая производительность, возможность организации линий транспортировки различной конфигурации, герметичность контура и минимальный контакт материала с внешней средой [3].

Эффективность пневматической транспортировки определяется совокупностью следующих факторов: режима транспортировки (диаграмма Зенца, рис. 1) [4], характеристик транспортируемого материала (тип, форма и размер частиц, влажность, массовая концентрация частиц), параметров потока газа (род, скорость, давление), геометрических параметров линии транспортировки (длины вертикальных и горизонтальных участков, число поворотных участков, диаметр трубопровода).

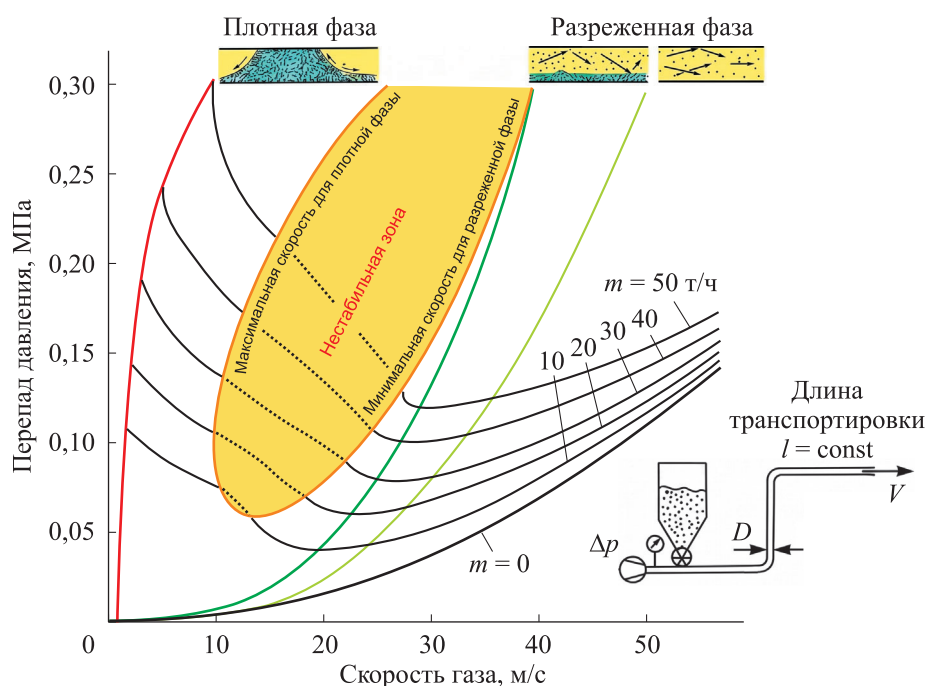


Рис. 1. Диаграмма Зенца

При эксплуатации систем пневматической транспортировки возникает ряд проблем, к которым относятся: износ внутренних поверхностей трубопроводов и запорно-регулирующей арматуры, образование завалов,

деградация транспортируемого материала вследствие механического воздействия на внутренние поверхности трубопровода, а также избыточное энергопотребление.

Цель настоящей работы — анализ и систематизация методов и перспективных технологий повышения эффективности систем пневматической транспортировки сыпучих материалов.

Абразивный износ оборудования. Движение твердых частиц в системах пневматической транспортировки приводит к их соударениям и трению о стенки трубопровода, особенно в местах изменения направления потока и локальных сопротивлений [5]. Данный вид механического износа, вызванный воздействием потока частиц, также называется эрозией. При транспортировке абразивных материалов (песка, золы, цемента, металлических порошков) происходит износ внутренних поверхностей труб, поворотных колен, запорно-регулирующей арматуры и питающих устройств [6]. Интенсивность эрозии возрастает с увеличением скорости потока газа (рис. 2) и уменьшением массовой концентрации (отношение масс транспортируемого материала и транспортирующего газа) транспортируемого материала (рис. 3) [7–12].

Наиболее интенсивному воздействию потока частиц подвергаются поворотные участки трубопровода, которые изнашиваются быстрее вследствие увеличения скорости потока по мере падения давления по длине линии транспортировки. Это приводит не только к потере качества транспортируемого материала, но и к смешиванию его с частицами конструкционных материалов (металла, полимеров), что особенно критично для пищевой и фармацевтической промышленности [9].

Для снижения абразивного износа применяется целый ряд технических решений. Первоочередной мерой является ограничение скорости транспортирующего газа до минимально допустимых значений, обеспечивающих постоянную транспортировку материала. Особенно эффективным является переход на режим транспортировки в плотной фазе, при котором материал перемещается при существенно меньших скоростях транспорти-

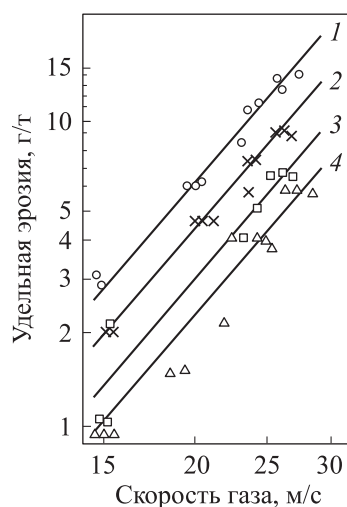


Рис. 2. Зависимость удельной эрозии от скорости потока газа при пневматической транспортировке песка (размер частиц 230 мкм, массовая концентрация $\mu = 2$); 1–4 — серии экспериментальных испытаний

рующего газа, обычно не более 5 м/с [3, 10]. При транспортировке на режиме плотной фазы износ элементов оборудования снижается в несколько раз по сравнению с режимом разреженной фазы, однако становится проблематичной транспортировка в вертикальных участках трубопровода [11].

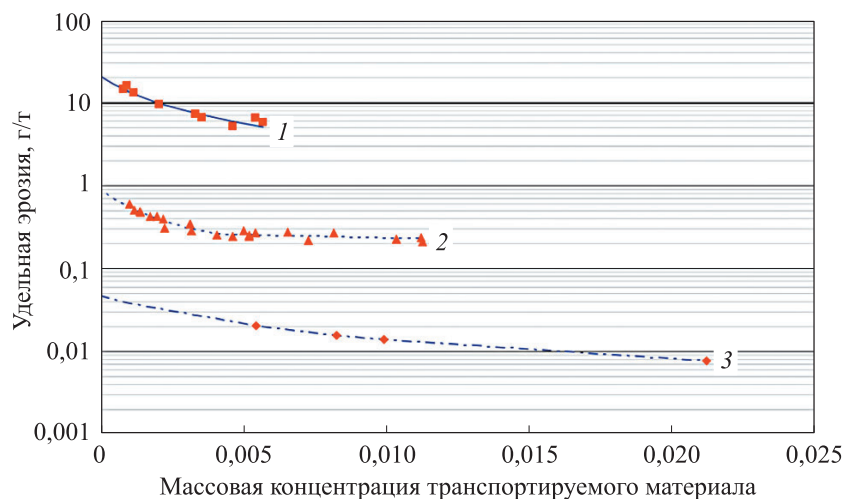


Рис. 3. Зависимость удельной эрозии от массовой концентрации транспортируемого оливинного песка (1), кремниевого порошка (2), древесной пыли (3):

■, ▲, ◆ — эксперимент; —, ..., -.- — модель

Конструктивные решения включают в себя уменьшение числа поворотных участков, как наиболее нагруженных, применение износостойких материалов и специальных элементов в наиболее подверженных эрозии участках трубопровода. На поворотных участках устанавливают колена увеличенного радиуса, снижающие ударные нагрузки, или специальные конструкции с «карманами» для создания защитного слоя из транспортируемого материала [11], используют вставки из закаленных сталей, износостойких сплавов и резины [12, 13]. Для магистралей, транспортирующих абразивные материалы высокой твердости, применяют трубопроводы со сменными защитными секциями на критических участках. На рис. 4 приведено износостойкое поворотное колено с быстроразъемной резиновой вставкой [13].

Регулярный контроль толщины стенок виброакустическими и электростатическими методами позволяет своевременно выявлять критический износ и планировать замену элементов [14, 15]. Экспериментальная зависимость потерь массы (эрозии) материала поверхности поворотного колена трубопровода от массы песка, транспортируемого через систему [15], приведена на рис. 5.

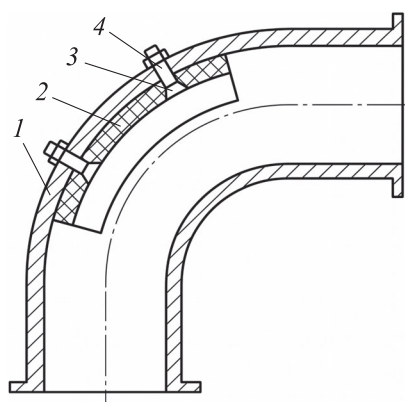


Рис. 4. Износостойкое поворотное колено с быстроразъемной резиновой вставкой:
1 — корпус поворотного колена;
2 — резиновая вставка; 3 — болт;
4 — гайка

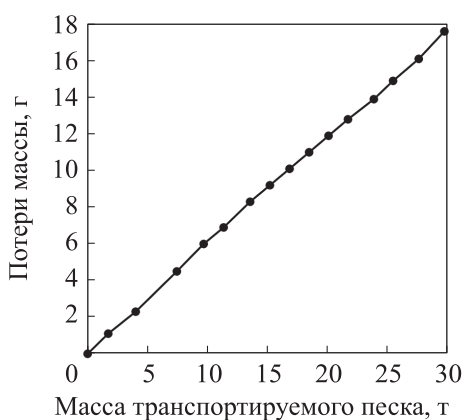


Рис. 5. Экспериментальная зависимость потерь массы (эрозии) материала поверхности поворотного колена трубопровода от массы песка, транспортируемого через систему

Завал трубопровода. Под завалом трубопровода понимают закупоривание транспортирующего трубопровода сыпучим материалом, возникающее вследствие некорректно выбранных параметров, характеризующих режим транспортировки. Завал представляет собой наиболее распространенную эксплуатационную проблему систем пневматической транспортировки [16]. Образование пробок обусловлено комплексом факторов. При снижении скорости потока воздуха ниже минимально необходимого значения происходит оседание частиц с последующим формированием завалов, что зачастую наблюдается при транспортировке на режиме плотной фазы [2, 3]. Данное явление возникает при некорректном расчете режимных параметров или изменении массовой производительности системы без соответствующей коррекции требуемого расхода воздуха. Исследования показывают возможность кратковременного повышения давления при пуске нагнетательных систем с непрерывно действующими питателями, приводящего к формированию завала в начальных участках трубопровода [2]. Свойства транспортируемого материала существенно влияют на образование завалов, влажные порошкообразные материалы склонны к слипанию и адгезии к стенкам трубопровода.

Завал трубопровода ведет к прекращению транспортировки, росту давления перед образовавшейся пробкой и требует операций по восстановлению работоспособности системы. Для предотвращения завала на стадии

проектирования системы с запасом рассчитывается необходимая скорость воздушного потока для заданного режима транспортировки.

Для обеспечения стабильного режима транспортировки применяются питатели с регулируемой производительностью, обеспечивающие равномерную подачу материала [7]. В критических участках трассы устанавливают дополнительные воздушные вводы для продувки образовавшихся при завале пробок. Обнаружить завалы можно с помощью систем мониторинга: характерные изменения амплитуды колебаний давления и расхода воздуха в трубопроводе сигнализируют о переходе потока в нестабильный режим.

Важным направлением развития систем пневматической транспортировки сыпучих материалов является внедрение автоматических систем мониторинга и сбора данных (*Supervisory Control and Data Acquisition*), а также систем управления на базе программируемых логических контроллеров. Современные системы управления в реальном времени анализируют данные от датчиков давления, температуры, расхода, вибрации и автоматически корректируют параметры транспортировки для предотвращения завалов [17].

Энергетическая эффективность. Гидравлическое сопротивление элементов трубопровода вызывает потери давления, которые являются важной характеристикой систем пневматической транспортировки.

Причинами потерь давления могут являться трение газа о стенки трубопровода; взаимодействие частиц с поверхностью трубопровода; ускорение дисперсной фазы; подъем материала на высоту; преодоление местных сопротивлений.

При увеличении потерь давления для обеспечения процесса пневматической транспортировки требуется повышать мощность компрессора, затрачиваемую на сжатие газа.

Применение трубопроводов с увеличивающимся по длине диаметром (ступенчатых систем) позволяет существенно снизить гидравлические потери. Численное моделирование и экспериментальные исследования подтверждают преимущества ступенчатых систем перед трубопроводами постоянного диаметра при одинаковой производительности в случае транспортировки на относительно большие расстояния [3, 18]. В результате сравнительных испытаний определено, что при фиксированных значениях массовых производительности и концентрации материала потери давления в ступенчатой системе снижаются [18]. Зависимости потерь давления от массового расхода газа при различных диаметрах трубопровода приведены на рис. 6. Эффективность ступенчатых систем возрастает с увеличе-

нием расхода воздуха. Механизм снижения потерь обусловлен уменьшением скорости газа после расширения трубопровода, что приводит к уменьшению потерь на трение и снижению эрозионного износа.

В горизонтальных участках систем пневматической транспортировки зависимость потерь давления от скорости потока газа, например, при транспортировке полиэтилена, имеет ярко выраженный экстремум (рис. 7) [19]. При увеличении скорости воздушного потока потери давления первоначально снижаются, достигают минимума, а затем возрастают. Скорость, соответствующая минимуму потерь, представляет собой оптимальную скорость для транспортировки с минимальными энергетическими затратами [19].

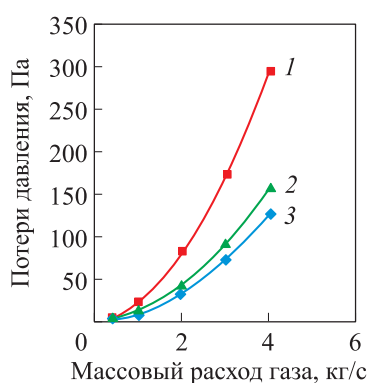


Рис. 6. Зависимости потерь давления от массового расхода газа при диаметре трубопровода 324 (1), 400 мм (2) и переменном (3) диаметре

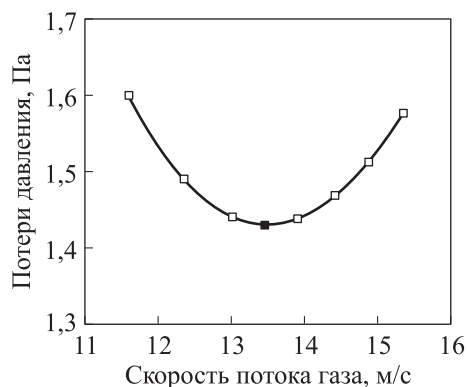


Рис. 7. Зависимость потерь давления от скорости потока газа при транспортировке полиэтилена (■ — экстремум)

При транспортировке полиакриламида на зависимости удельных потерь давления от массовой концентрации транспортируемого материала в горизонтальных участках системы наблюдаются критические точки, например, при расходе материала 8909 кг/ч минимум потерь достигается при массовой концентрации транспортируемого материала в газовой фазе 20,44 (рис. 8) [20]. Дальнейшее увеличение концентрации приводит к накоплению материала в нижней части трубопровода и росту потерь на трение. Уменьшение концентрации ниже рекомендуемого значения увеличивает затраты энергии на ускорение частиц [20, 21].

Перспективным методом снижения потерь давления в системах пневматической транспортировки сыпучих материалов на режиме плотной фазы является применение ультразвуковой вибрации. Установка участков трубопровода с ультразвуковыми излучателями (частота

~ 20,5 кГц) обеспечивает линейное снижение перепада давления на участках трубопровода, содержащих завалы материала [22]. Эффективность метода максимальна при низких скоростях движения частиц, когда контактное давление на стенки минимально, что важно для предотвращения пробок в системах.

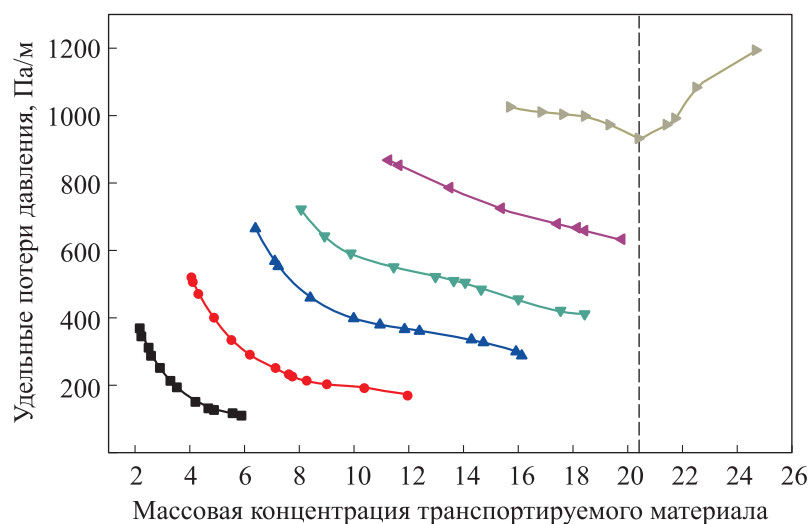


Рис. 8. Зависимость удельных потерь давления от массовой концентрации транспортируемого материала в горизонтальных участках системы при расходе материала 1495 (■), 2870 (●), 4530 (▲), 5665 (▼), 7246 (◆), 8909 кг/ч (→)

Деградация транспортируемого материала. При пневматической транспортировке материалов, имеющих низкую механическую прочность, происходит их частичное разрушение вследствие соударений частиц между собой и со стенками трубопровода [23, 24]. Деградация проявляется в измельчении частиц, образовании пылевидной фракции, изменении формы гранул, образовании лент («волос ангела») при транспортировке, например, гранул полиэтилена.

При транспортировке полимерных гранулированных материалов на режиме разреженной фазы наблюдается образование лент вследствие локального плавления поверхности частиц при трении о стенки трубопровода [25, 26], что вызывает засорение фильтрующих элементов, ухудшает качество продукта и может привести к завалу в поворотных участках. Для снижения лентообразования применяют поворотные колена различной формы [27]. Поворотное колено, полученное путем оптимизации геометрических параметров [26], приведено на рис. 9.

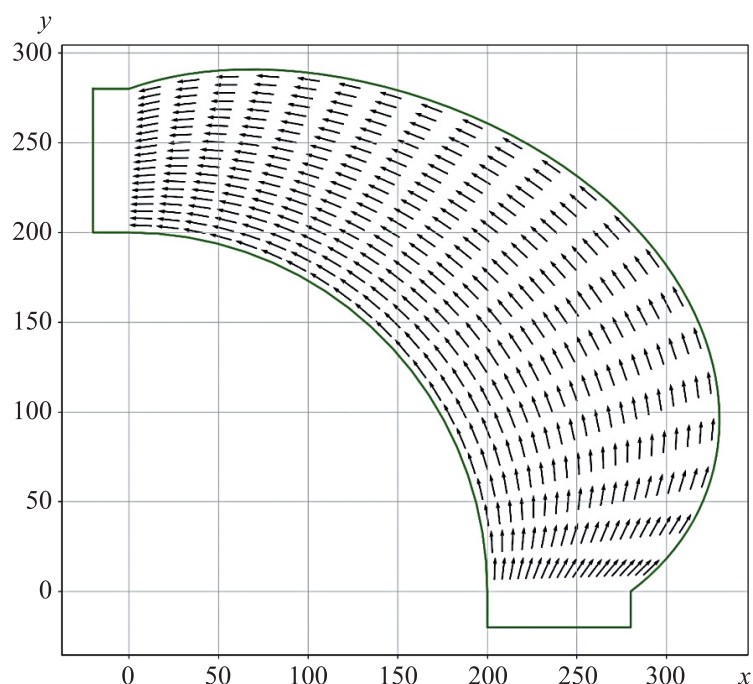


Рис. 9. Поворотное колено, полученное путем оптимизации геометрических параметров

При отсутствии полного разрушения транспортируемого материала возможно снижение качественных показателей конечного продукта. В фармацевтической промышленности механическое воздействие и нагрев могут негативно влиять на стабильность активных веществ. При транспортировке многокомпонентных смесей истирание приводит к фракционированию и нарушению однородности состава [27, 28].

Основным методом уменьшения деградации является снижение скорости транспортируемого материала. Распределение размеров частиц соли при различных скоростях транспортировки приведено на рис. 10 [29].

Для снижения деградации в конструкции трубопроводов также предусматриваются элементы для снижения ударных нагрузок: расширительные камеры перед поворотами, где скорость потока кратковременно снижается, замедляющие секции перед приемными устройствами. Материалы, чувствительные к окислению или влажности, транспортируются в среде инертного газа, что предотвращает их деградацию.

Заключение. Проведенный анализ состояния и перспектив развития систем пневматической транспортировки позволяет сформулировать следующие основные выводы.

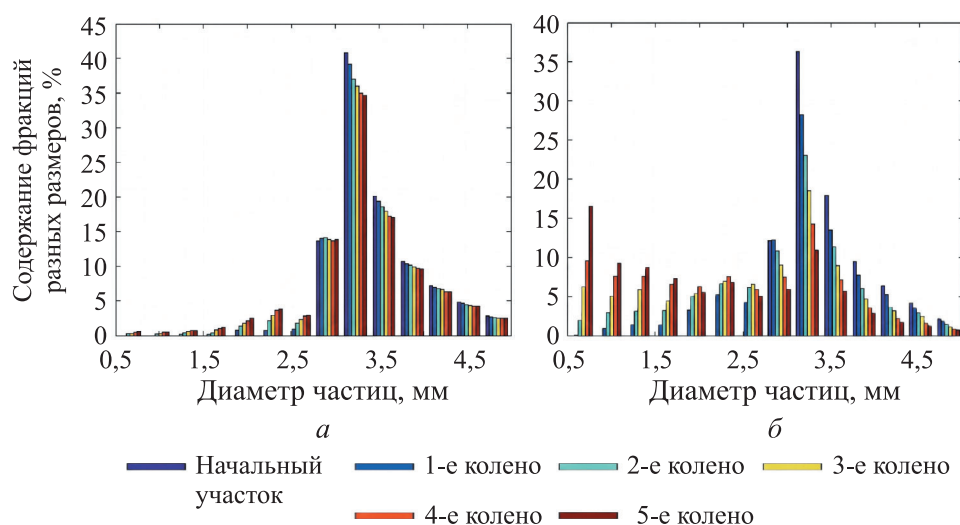


Рис. 10. Распределение размеров частиц соли при скоростях транспортировки 35 (а) и 56 м/с (б)

Абразивный износ оборудования остается серьезной проблемой, однако современные методы мониторинга на основе виброакустических и электростатических технологий в сочетании с предиктивной аналитикой и применением новых конструктивных решений существенно увеличивают межремонтный период эксплуатации оборудования.

Образование завалов в трубопроводах обусловлено нарушением режимных параметров, что требует комплексного подхода к обеспечению непрерывного процесса транспортировки. Внедрение систем автоматического регулирования, установка дополнительных воздушных вводов в критических участках трассы и применение систем мониторинга позволяют обеспечить непрерывную работу системы.

Повышение энергетической эффективности систем пневматической транспортировки достигается путем выбора оптимальных значений скорости воздушного потока и массовой концентрации материала, соответствующих минимуму потерь давления с последующим применением частотно-регулируемых приводов, оптимизацией геометрических параметров трубопровода и применением ступенчатых систем с переменным диаметром при проектировании новых систем, а также использованием ультразвуковой вибрации при транспортировке на режиме плотной фазы, позволяющей дополнительно снизить энергозатраты.

Сохранение качества транспортируемого материала требует минимизации механического воздействия, что достигается снижением скорости

транспортировки, оптимизацией геометрических параметров трубопровода и применением специальных конструктивных решений для снижения ударных нагрузок по нескольким критериям оптимальности.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание универсальных методов расчета параметров и проектирования систем пневматической транспортировки с учетом специфики конкретных отраслей промышленности и свойств транспортируемых материалов с последующей их интеграцией с системами автоматического управления и предиктивной аналитики.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Островский Г.М. Пневматический транспорт сыпучих материалов в химической промышленности. Л., Химия, 1984.
- [2] Тарасов В.П., Тарасов А.В. Анализ особенностей нагнетающих систем пневмотранспорта с приводными питателями при их работе в переходных и неустановившихся режимах. *Ползуновский вестник*, 2022, № 3, с. 50–57. EDN: BRJDJI
- [3] Mills D. *Pneumatic conveying design guide*. Oxford, Elsevier, 2004.
- [4] De Freitas A.G., dos Santos R.B., Riascos L.A.M., et al. Experimental design and optimization of a novel solids feeder device in energy efficient pneumatic conveying systems. *Energy Rep.*, 2023, vol. 9, pp. 387–400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.05.270>
- [5] Abe M.C., Gelladuga G.A., Mendoza C.J., et al. Pneumatic conveying technology: recent advances and future outlook. *Eng. Proc.*, 2023, vol. 56, no. 1, art. 205. DOI: <https://doi.org/10.3390/ASEC2023-16267>
- [6] Klinzing G.E., Rizk F., Marcus R.D., et al. *Pneumatic conveying of solids*. Chapman & Hall, 1997.
- [7] Путилов В.Я., Прохоров В.Б., Путилова И.В. Анализ абразивного износа трубопроводов при пневмотранспорте мелкодисперсных сыпучих материалов. *Теплоэнергетика*, 2003, № 1, с. 61–67. EDN: PFYYPB
- [8] Duarte C.A.R., de Souza F.J., de Vasconcelos Salvo R., et al. The role of inter-particle collisions on elbow erosion. *Int. J. Multiph. Flow*, 2017, vol. 89, pp. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.10.001>
- [9] Verma R., Agarwal V.K., Pandey R.K., et al. Erosive wear reduction for safe and reliable pneumatic conveying systems: review and future directions. *Life Cycle Reliab. Saf. Eng.*, 2018, vol. 7, no. 3, pp. 193–214. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41872-018-0055-7>
- [10] Zhou J.W., Liu Y., Liu S.Y., et al. Effects of particle shape and swirling intensity on elbow erosion in dilute-phase pneumatic conveying. *Wear*, 2017, vol. 380, pp. 66–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.03.009>
- [11] Macchini R., Bradley M.S.A., Deng T. Influence of particle size, density, particle concentration on bend erosive wear in pneumatic conveyors. *Wear*, 2013, vol. 303, no. 1-2, pp. 21–29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.02.014>

- [12] Zhang Y., Zhou C., Liu H., et al. Abrasion resistant elbow. Patent CN 202828953. Appl. 23.04.2012, publ. 27.03.2013.
- [13] Yang C., Yang Z., Yang B. Abrasion-resistant ceramic elbow. Patent US 20080169642. Appl. 14.08.2007, publ. 17.07.2008.
- [14] Haugland I.B., Chladek J., Halstensen M. Monitoring of erosion in a pneumatic conveying system by non-intrusive acoustic sensors — a feasibility study. *Linköping Electronic Conference Proceedings*, 2019, vol. 1709, no. 12, pp. 78–84.
DOI: <https://doi.org/10.3384/ecp2017078>
- [15] Henry R.M., Al-Faysale M.S.M. Condition monitoring of bends in pneumatic conveying systems. In: *COMADEM 89 International*. Boston, Springer, 1989, pp. 525–529.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8905-7_84
- [16] Разумов И.М. Псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов. М., Химия, 1972.
- [17] Barbosa P.R., Selegim Jr.P. On the application of fuzzy logic control in pneumatic conveying systems. *Journal of the Brazilian Neural Network Society*, 2011, vol. 9, no. 4, pp. 256–265. DOI: <http://dx.doi.org/10.21528/lnlm-vol9-no4-art4>
- [18] Li Z., Chu K., Pan R., et al. Computational study of gas-solid flow in a horizontal stepped pipeline. *Math. Probl. Eng*, 2019, art. 2545347.
DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/2545347>
- [19] Zheng Y., Rinoshika A. Analysis of particle dynamics in a horizontal pneumatic conveying of the minimum pressure drop based on POD and wavelet transform. *Powder Technol.*, 2017, vol. 320, pp. 726–738. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.07.092>
- [20] Jia W., Yan J. Pressure drop characteristics and minimum pressure drop velocity for pneumatic conveying of polyacrylamide in a horizontal pipe with bends at both ends. *Powder Technol.*, 2020, vol. 372, pp. 192–203.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.004>
- [21] Dikty M., Hilgraf P., Worthington R. Energy-saving pneumatic conveying pipe system. *IEEE Cement Industry Techn. Conf. Record*, 2008, pp. 229–240.
DOI: <https://doi.org/10.1109/CITCON.2008.25>
- [22] Kofu K. Pressure loss reduction in horizontal plug conveying of granular particles with ultrasonic vibration. *Powder Technol.*, 2016, vol. 294, pp. 202–210.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.02.034>
- [23] Kalman H. Attrition of powders and granules at various bends during pneumatic conveying. *Powder Technol.*, 2000, vol. 112, no. 3, pp. 244–250.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(00\)00298-9](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(00)00298-9)
- [24] Chapelle P., Christakis N., Abou-Chakra H., et al. Computational model for prediction of particle degradation during dilute-phase pneumatic conveying: modeling of dilute-phase pneumatic conveying. *Adv. Powder Technol.*, 2004, vol. 15, no. 1, pp. 31–49.
DOI: <https://doi.org/10.1163/15685520460740052>

- [25] Очков А.А., Скорняков В.М. Оптимизация геометрических параметров колена трубопровода в системах пневмотранспорта полиэтилена. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2024, № 4 (151), с. 82–95. EDN: WFXKYM
- [26] Lorenz R.D. A theory of angel hair: analytic prediction of frictional heating of particulates in pneumatic transport. *Powder Technol.*, 2019, vol. 355, pp. 264–267. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.057>
- [27] Dhodapkar S., Solt P., Klinzing G. Understanding bends in pneumatic conveying systems. *Chem. Eng.*, 2009, vol. 116, no. 4, pp. 53–60.
- [28] Kotzur B.A., Bradley M.S., Berry, R.J., et al. Breakage characteristics of granulated food products for prediction of attrition during lean-phase pneumatic conveying. *Int. J. Food Eng.*, 2016, vol. 12, no. 9, pp. 835–850. DOI: <https://doi.org/10.1515/ijfe-2016-0045>
- [29] Brosh T., Kalman H., Levy A. DEM simulation of particle attrition in dilute-phase pneumatic conveying. *Granular Matter*, 2011, vol. 13, no. 2, pp. 175–181. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10035-010-0201-z>

Демихов Константин Евгеньевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Очков Андрей Андреевич — д-р техн. наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Скорняков Владимир Михайлович — ассистент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Демихов К.Е., Очков А.А., Скорняков В.М. Перспективы развития систем пневматической транспортировки сыпучих материалов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2026, № 2 (157), с. 85–101. EDN: MZKPOK

**DEVELOPMENT PROSPECTS OF PNEUMATIC
CONVEYING SYSTEMS FOR BULK SOLIDS**

K.E. Demikhov

A.A. Ochkov

V.M. Skornyakov

ked@bmstu.ru

aochkov@bmstu.ru

skornyakov@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article analyzes the current state of pneumatic conveying systems for bulk solids. Four key problems affecting the efficiency of such systems are considered: 1) abrasive wear of system components, 2) formation of material blockages in pipelines, 3) low energy efficiency, 4) degradation of conveyed material. It is established that the intensity of abrasive wear is determined by the conveying gas flow velocity and the mass concentration of the conveyed material. It is shown that blockage formation is caused by flow velocity reduction below minimum required values, changes in properties of the conveyed material, and system operation instability. The patterns of pressure loss variation as a function of air flow velocity and material mass concentration are presented. Methods and promising technologies for improving the efficiency of pneumatic conveying systems are systematized: transition to dense phase conveying mode, application of wear-resistant materials and special structural elements, use of stepped systems with variable pipeline diameter, implementation of fault monitoring systems and automatic control of process parameters. The results of the conducted research can be used in the design, operation, and modernization of industrial pneumatic conveying systems for bulk solids

Keywords

Pneumatic conveying, bulk solids, efficiency improvement, energy efficiency, development prospects, parameter optimization

Received 01.12.2025

Accepted 09.02.2026

© Author(s), 2026

REFERENCES

- [1] Ostrovskiy G.M. Pnevmaticheskiy transport sypuchikh materialov v khimicheskoy promyshlennosti [Pneumatic transport of bulk materials in the chemical industry]. Lenin-grad, Khimiya Publ., 1984.
- [2] Tarasov V.P., Tarasov A.V. Analysis of the features of pneumatic transport injection systems with drive feeders during their operation in transient and unsteady modes. *Polzunovskiy vestnik*, 2022, no. 3, pp. 50–57 (in Russ.). EDN: BRJDI
- [3] Mills D. Pneumatic conveying design guide. Oxford, Elsevier, 2004.
- [4] De Freitas A.G., dos Santos R.B., Riascos L.A.M., et al. Experimental design and optimization of a novel solids feeder device in energy efficient pneumatic conveying systems. *Energy Rep.*, 2023, vol. 9, pp. 387–400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.270>
- [5] Abe M.C., Gelladuga G.A., Mendoza C.J., et al. Pneumatic conveying technology: recent advances and future outlook. *Eng. Proc.*, 2023, vol. 56, no. 1, art. 205. DOI: <https://doi.org/10.3390/ASEC2023-16267>

- [6] Klinzing G.E., Rizk F., Marcus R.D., et al. Pneumatic conveying of solids. Chapman & Hall, 1997.
- [7] Putilov V.Ya., Prokhorov V.B., Putilova I.V. Analyzing abrasive wear in the pipelines of pneumatic systems conveying finely dispersed loose materials. *Therm. Eng.*, 2003, vol. 50, no. 1, pp. 64–71.
- [8] Duarte C.A.R., de Souza F.J., de Vasconcelos Salvo R., et al. The role of inter-particle collisions on elbow erosion. *Int. J. Multiph. Flow*, 2017, vol. 89, pp. 1–22.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.10.001>
- [9] Verma R., Agarwal V.K., Pandey R.K., et al. Erosive wear reduction for safe and reliable pneumatic conveying systems: review and future directions. *Life Cycle Reliab. Saf. Eng.*, 2018, vol. 7, no. 3, pp. 193–214. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41872-018-0055-7>
- [10] Zhou J.W., Liu Y., Liu S.Y., et al. Effects of particle shape and swirling intensity on elbow erosion in dilute-phase pneumatic conveying. *Wear*, 2017, vol. 380, pp. 66–77.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.03.009>
- [11] Macchini R., Bradley M.S.A., Deng T. Influence of particle size, density, particle concentration on bend erosive wear in pneumatic conveyors. *Wear*, 2013, vol. 303, no. 1-2, pp. 21–29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.02.014>
- [12] Zhang Y., Zhou C., Liu H., et al. Abrasion resistant elbow. Patent CN 202828953. Appl. 23.04.2012, publ. 27.03.2013.
- [13] Yang C., Yang Z., Yang B. Abrasion-resistant ceramic elbow. Patent US 20080169642. Appl. 14.08.2007, publ. 17.07.2008.
- [14] Haugland I.B., Chladek J., Halstensen M. Monitoring of erosion in a pneumatic conveying system by non-intrusive acoustic sensors — a feasibility study. *Linköping Electronic Conference Proceedings*, 2019, vol. 1709, no. 12, pp. 78–84.
DOI: <https://doi.org/10.3384/ecp2017078>
- [15] Henry R.M., Al-Faysale M.S.M. Condition monitoring of bends in pneumatic conveying systems. In: *COMADEM 89 International*. Boston, Springer, 1989, pp. 525–529.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8905-7_84
- [16] Razumov I.M. Psevdoozhizhenie i pnevmotransport sypuchikh materialov [Fluidization and pneumatic transport of bulk materials]. Moscow, Khimiya Publ., 1972.
- [17] Barbosa P.R., Seleghim Jr.P. On the application of fuzzy logic control in pneumatic conveying systems. *Journal of the Brazilian Neural Network Society*, 2011, vol. 9, no. 4, pp. 256–265. DOI: <http://dx.doi.org/10.21528/lnlm-vol9-no4-art4>
- [18] Li Z., Chu K., Pan R., et al. Computational study of gas-solid flow in a horizontal stepped pipeline. *Math. Probl. Eng.*, 2019, art. 2545347.
DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/2545347>
- [19] Zheng Y., Rinoshika A. Analysis of particle dynamics in a horizontal pneumatic conveying of the minimum pressure drop based on POD and wavelet transform. *Powder Technol.*, 2017, vol. 320, pp. 726–738.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.07.092>

- [20] Jia W., Yan J. Pressure drop characteristics and minimum pressure drop velocity for pneumatic conveying of polyacrylamide in a horizontal pipe with bends at both ends. *Powder Technol.*, 2020, vol. 372, pp. 192–203.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.004>
- [21] Dikty M., Hilgraf P., Worthington R. Energy-saving pneumatic conveying pipe system. *IEEE Cement Industry Techn. Conf. Record*, 2008, pp. 229–240.
DOI: <https://doi.org/10.1109/CITCON.2008.25>
- [22] Kofu K. Pressure loss reduction in horizontal plug conveying of granular particles with ultrasonic vibration. *Powder Technol.*, 2016, vol. 294, pp. 202–210.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.02.034>
- [23] Kalman H. Attrition of powders and granules at various bends during pneumatic conveying. *Powder Technol.*, 2000, vol. 112, no. 3, pp. 244–250.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(00\)00298-9](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(00)00298-9)
- [24] Chapelle P., Christakis N., Abou-Chakra H., et al. Computational model for prediction of particle degradation during dilute-phase pneumatic conveying: modeling of dilute-phase pneumatic conveying. *Adv. Powder Technol.*, 2004, vol. 15, no. 1, pp. 31–49.
DOI: <https://doi.org/10.1163/15685520460740052>
- [25] Ochkov A.A., Skorniyakov V.M. Optimizing geometric parameters of a pipeline elbow in the pneumatic polyethylene transportation systems. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2024, no. 4 (151), pp. 82–95 (in Russ.).
EDN: WFXKYM
- [26] Lorenz R.D. A theory of angel hair: analytic prediction of frictional heating of particulates in pneumatic transport. *Powder Technol.*, 2019, vol. 355, pp. 264–267.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.057>
- [27] Dhodapkar S., Solt P., Klinzing G. Understanding bends in pneumatic conveying systems. *Chem. Eng.*, 2009, vol. 116, no. 4, pp. 53–60.
- [28] Kotzur B.A., Bradley M.S., Berry, R.J. et al. Breakage characteristics of granulated food products for prediction of attrition during lean-phase pneumatic conveying. *Int. J. Food Eng.*, 2016, vol. 12, no. 9, pp. 835–850. DOI: <https://doi.org/10.1515/ijfe-2016-0045>
- [29] Brosh T., Kalman H., Levy A. DEM simulation of particle attrition in dilute-phase pneumatic conveying. *Granular Matter*, 2011, vol. 13, no. 2, pp. 175–181.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10035-010-0201-z>

Demikhov K.E. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Vacuum and Compressor Equipment, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Ochkov A.A. — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Vacuum and Compressor Equipment, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Skornyakov V.M. — Assistant, Department of Vacuum and Compressor Equipment, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Demikhov K.E., Ochkov A.A., Skornyakov V.M. Development prospects of pneumatic conveying systems for bulk solids. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2026, no. 2 (157), pp. 85–101 (in Russ.). EDN: MZKPOK