

Г. Н. Хан¹, Е. П. Русин^{1}*

О влиянии формы сечения и скорости вращения горизонтального трубопровода на эффективность транспортирования твердых частиц

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: gmmlab@misd.ru

Аннотация. С использованием плоского макета выполнены экспериментальные исследования поведения твердых частиц в поперечном сечении горизонтального трубопровода, вращающегося вокруг своей продольной оси. Исходя из того, что эффективность транспортирования сыпучего материала в таких условиях зависит от доли его частиц, находящихся во взвешенном состоянии, подтверждены полученные ранее численно выводы о влиянии формы поперечного сечения трубопровода на эффективность транспортирования по нему твердых частиц. Подтверждено, что наиболее выгодны эллиптическая и прямоугольная формы с соотношением размеров 1:2, так как эти формы обеспечивают нахождение во взвешенном состоянии наибольшего количества частиц. Совпадением результатов физических и вычислительных экспериментов подтверждена адекватность основанных на МДЭ алгоритмов, используемых в настоящем цикле исследований.

Ключевые слова: горизонтальный трубопровод, форма поперечного сечения, вращение, транспортирование, твердые частицы, физический эксперимент, метод дискретных элементов

G. N. Khan¹, E. P. Rusin^{1}*

On the influence of the cross-sectional shape and rotation speed of the horizontal pipeline on the efficiency of transportation of solid particles

¹ Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: gmmlab@misd.ru

Abstract. Using a flat model, experimental studies of the behavior of solid particles in the cross section of a horizontal pipeline rotating around its longitudinal axis were carried out. Based on the fact that the efficiency of transportation of particulate material under such conditions depends on the proportion of its particles in suspension, the previously obtained numerical conclusions about the influence of the cross-sectional shape of the pipeline on the efficiency of transporting solid particles through it are confirmed. The elliptical and rectangular shapes with a dimension ratio of 1:2 have been found to be the most advantageous, as these shapes provide the highest amount of particles in suspension. The coincidence of the results of laboratory and computational experiments confirmed the adequacy of the DEM-based algorithms used in this series of studies.

Keywords: horizontal pipeline, cross-sectional shape, rotation, transportation, solid particles, laboratory experiment, discrete element method

Введение

Пневматическое транспортирование твердых частиц по вращающемуся горизонтальному трубопроводу – ключевой процесс в технологиях проходки горизонтальных скважин в горных породах и грунтах с пневматическим шламотранспортом и обратной циркуляцией очистного агента [1-6]. Вращение пневмот-

транспортной магистрали положительно влияет на производительность транспортирования частиц и снижает вероятность аварии вследствие закупоривания транспортного тракта [6-8]. В работах [9,10] с привлечением комбинации метода дискретных элементов (МДЭ) и вычислительной газодинамики исследовано влияние скорости вращения и скорости потока газа на производительность пневмотранспорта. Однако, в [11] установлено, что существенное влияние на эффективность обсуждаемого процесса оказывает также форма поперечного сечения трубопровода. При этом в качестве критерия эффективности, определяющего производительность транспортирования сыпучего материала, была принята доля частиц, находящихся во взвешенном состоянии. Задача решалась численно с использованием МДЭ. Для того чтобы выявить влияние формы поперечного сечения трубопровода и исключить воздействие других факторов, моделирование в [11] проводилось в плоской постановке.

Цель настоящей работы – экспериментальное подтверждение выводов и рекомендаций, полученных при численном моделировании [11], а также адекватности использованных алгоритмов, основанных на МДЭ.

Методы и материалы

Для сравнения результатов настоящего физического эксперимента с результатами численного моделирования [11], проведенного в плоской постановке, лабораторный макет поперечного сечения трубопровода был также выполнен плоским (рис. 1). Макет представляет собой плоское цилиндрическое изготовленное из пластика основание 1 диаметром 165 мм с цилиндрическим плоским углублением диаметром 121 мм, дно которого для улучшения визуализации выполнено цветным. В углублении размещается плоский металлический шаблон 2 диаметром 120 мм и толщиной 2.9 мм с фигурной прорезью 3. Форма прорези 3 соответствует форме исследуемого поперечного сечения трубопровода. Далее шаблон именуется в соответствии с формой прорези в нем. Шаблон 2 закрыт стеклянной стенкой 4 (на рисунке ввиду прозрачности не видна), которая удерживается прижимным кольцом 5, соединенным с основанием 1 посредством винтовых стяжек 6. Дно углубления, прорезь 3 шаблона 2 и стеклянная стенка 4 образуют плоскую емкость, имитирующую поперечное сечение трубопровода той или иной формы (на рис. 1 – квадрат). Емкость заполняется сыпучим модельным материалом 7, в качестве которого в данном эксперименте использовалась металлическая дробь с частицами сферической формы радиусом 1.3 мм.

Всего в настоящем эксперименте исследовались 4 формы сечения трубопровода: квадрат размером 70.7 x 70.7 мм (см. рис. 1), а также три другие – окружность диаметром 100 мм, эллипс с полуосями 50 и 100 мм (соотношение полуосей 1:2), прямоугольник с размерами 45 x 90 мм (соотношение сторон 1:2). Размеры сечений выбирались из условия их вписывания в окружность диаметром 100 мм.

Макет устанавливался в шпиндель токарного станка, имеющего фиксированные скорости вращения ω_d от 12 до 1200 об/мин. Видеозапись эксперимента велась при помощи высокоскоростной видеокамеры Casio EX-F1 со скоростью

300 кадров в секунду. Полость шаблона заполнялась дробью примерно на треть площади отверстия шаблона. Доля частиц, находящихся во взвешенном состоянии, определялась подсчетом по отдельным кадрам видеосъемки. Задачей эксперимента являлось определение формы поперечного сечения трубопровода и скорости его вращения, при которых наибольшее число частиц находится во взвешенном состоянии.

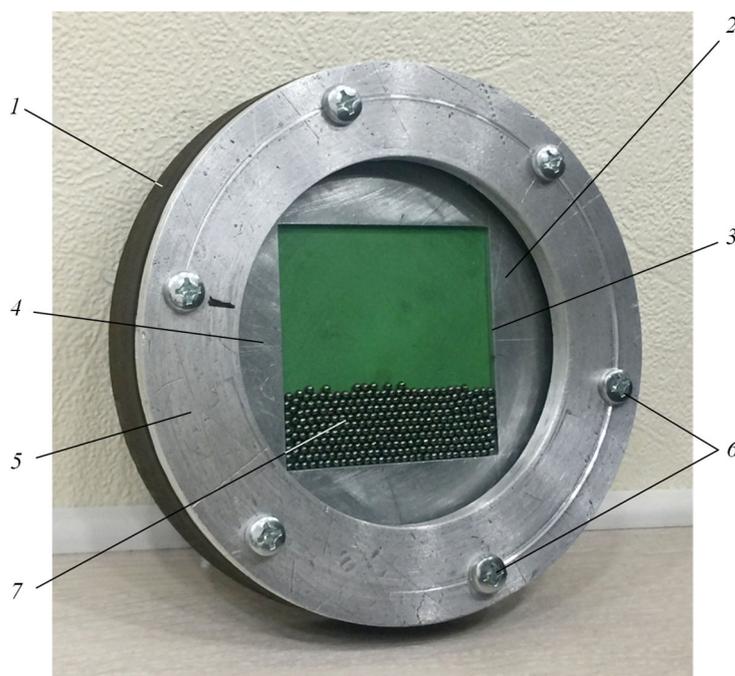


Рис. 1. Макет поперечного сечения вращающегося трубопровода: 1 – основание; 2 – шаблон поперечного сечения трубопровода; 3 – прорезь шаблона (в форме квадрата с размерами 70.7 x 70.7 мм); 4 – стеклянная передняя стенка стенда; 5 – прижимное кольцо; 6 – винтовые стяжки; 7 – модельный сыпучий материал

Результаты физического моделирования и их обсуждение, сравнение с результатами численного моделирования

Как показали эксперименты с шаблоном круглой формы (рис. 2), при всех значениях угловых скоростей ω_d в диапазоне от 120 (рис. 2а) до 600 (рис. 2б) об/мин частицы, достигнув некоторой высоты подъема, скатываются вдоль свободной границы сыпучего материала. Связано это с тем, что коэффициент трения между частицами и внутренней поверхностью круглого шаблона меньше критического, при котором частицы за счет центробежной силы прижимаются к поверхности шаблона при достижении им определенной угловой скорости и совершают полный оборот. Поэтому преобладающее большинство частиц не находится во взвешенном состоянии.

Шаблоны других форм (рис. 3) способны существенно более эффективно поднимать частицы в воздух. При этом для всех из них оптимальное значение

скорости вращения, обеспечивающее перевод наибольшего количества частиц во взвешенное состояние, оказалось одним и тем же: 120 об/мин. Максимальные доли взвешенных частиц для квадратной, эллиптической и прямоугольной форм шаблонов составили 25%, 78% и 76% соответственно. Таким образом, эллиптическая и прямоугольная формы сечений с соотношением сторон 1:2 обладают примерно одинаковой способностью перевода частиц сыпучего материала во взвешенное состояние и с этой точки зрения опережают квадратную и, тем более, круглую формы.

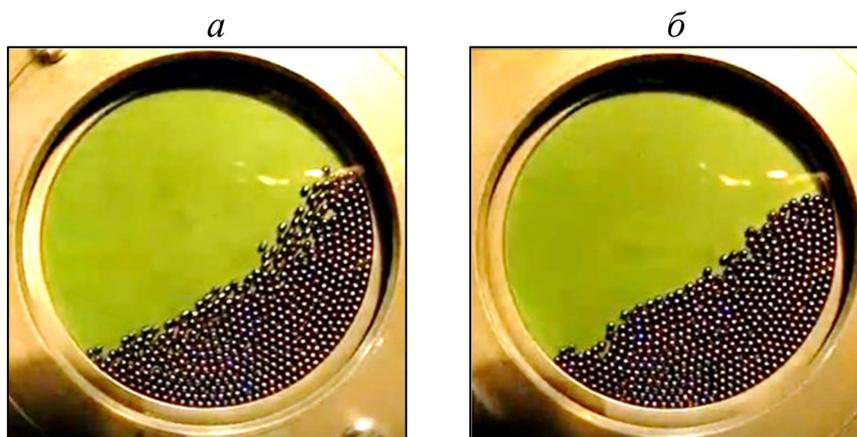


Рис. 2. Положения частиц в шаблоне круглой формы на установившихся стадиях его вращения: а) $\omega_d = 120$ об/мин; б) $\omega_d = 600$ об/мин

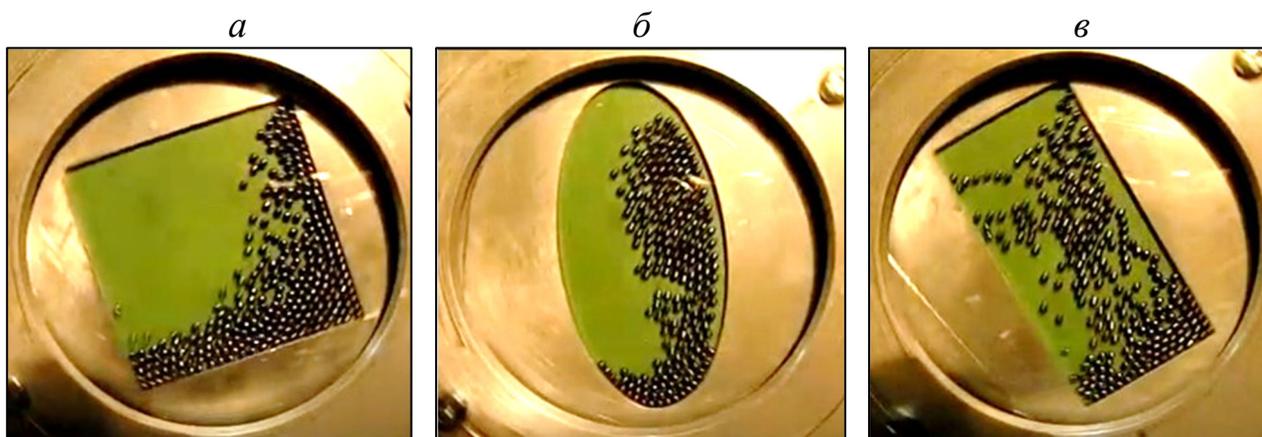


Рис.3. Стадии вращения шаблонов а) квадратной, б) эллиптической и в) прямоугольной форм с наибольшим количеством взвешенных частиц при $\omega_d = 120$ об/мин

Для подтверждения адекватности использованных в предыдущих исследованиях [11] алгоритмов, основанных на МДЭ, было проведено численное моделирование вращения шаблонов показанных выше форм, заполненных, как

и в физических экспериментах, примерно на треть частицами радиуса $r_i = 1.3$ мм со следующими физико-механическими характеристиками: плотность $\rho_i = 11000$ кг/м³; модуль упругости $E_i = 100$ МПа; коэффициент восстановления скорости $e_i = 0.2$; коэффициент трения $tg \varphi_i = 0.2$. Расчеты проведены по использованной в [11] методике с привлечением компьютерной программы PM2D [12]. На рис. 4 приведено сравнение результатов физических экспериментов с результатами расчетов. Из рисунка видно, что на подобных стадиях вращения в соответствующих экспериментах и расчетах частицы в среднем располагаются в примерно подобных точках плоскости.

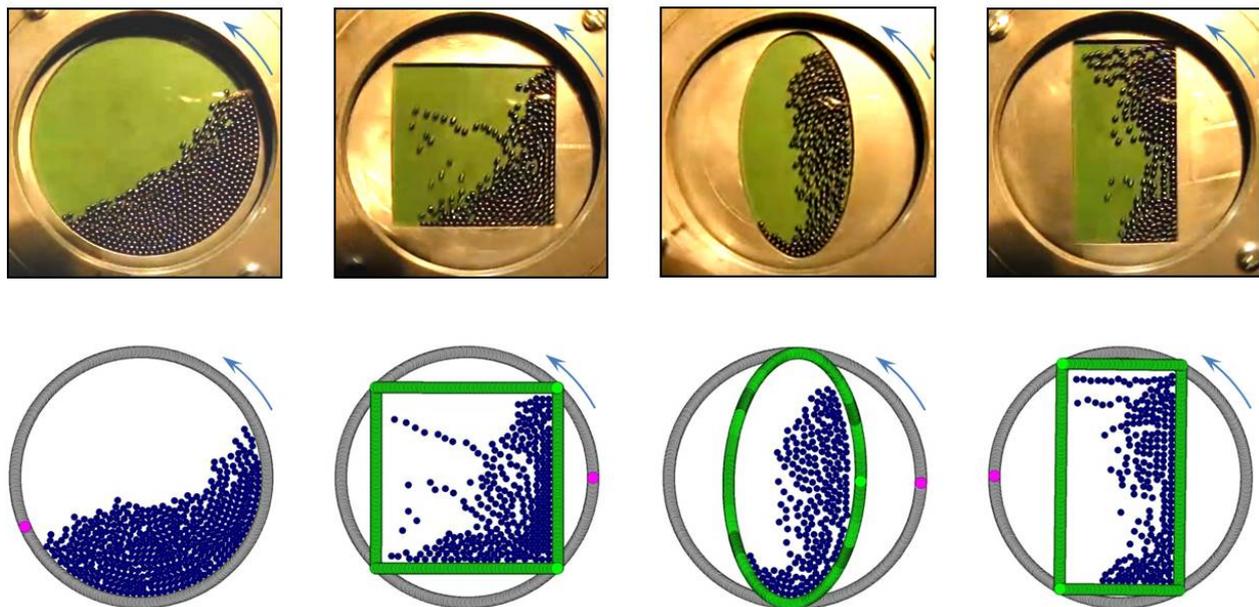


Рис. 4. Положения частиц в шаблонах различной формы при $\omega_d = 120$ об/мин на подобных стадиях вращения

Заключение

Физическими лабораторными экспериментами подтверждены полученные ранее численно выводы о влиянии формы поперечного сечения вращающегося вокруг продольной оси горизонтального трубопровода на эффективность транспортирования по нему твердых частиц. Установлено, что наиболее выгодны эллиптическая и прямоугольная формы с соотношением размеров 1:2. Для этих форм при диаметре описанной окружности 100 мм оптимальной является скорость вращения 120 об/мин. При указанных условиях в сечении трубопровода находится наибольшее количество взвешенных частиц.

Сравнением результатов физических и вычислительных экспериментов подтверждена адекватность основанных на МДЭ алгоритмов, используемых в настоящем цикле исследований поведения твердых частиц в поперечном сечении вращающегося горизонтального трубопровода.

Представленные результаты могут быть ориентиром для выбора конструктивных параметров и режимов работы трубопроводных систем, транспортирую-

ших твердые частицы. В зависимости от физико-механических характеристик конкретных транспортируемых материалов, может потребоваться уточнение этих параметров и режимов. Такое уточнение может быть осуществлено численно с привлечением МДЭ.

Работа выполнена в рамках проекта НИР FWNZ-2021-0003.

Авторы благодарят Н. Д. Сырямина за помощь в подготовке эксперимента и А. В. Белобородова за организацию видеосъемки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данилов Б.Б. Повышение эффективности бестраншейных способов подземного строительства за счет применения пневмотранспорта // ФТПРПИ. – 2007. – № 5. – С. 52 – 61. – EDN: IBNXEZ .
2. Пат. 2344241 РФ. Способ бестраншейной прокладки коммуникаций в грунте (варианты) / Б.Б. Данилов, Б.Н. Смоляницкий // Бюл. изобрет. – 2009. – № 2. – EDN: CDMLRG .
3. Смоляницкий Б.Н., Данилов Б.Б. Создание нового бурового комплекса для проходки протяженных горизонтальных скважин с транспортированием разрушенного грунта сжатым воздухом // Строительные и дорожные машины. – 2013. – № 7. – С. 17–22.
4. Zhang, X., Long, Q., Zhu, Z. *et al.* A novel reverse circulation drilling device for the underground sampling to soft coal // Arabian Journal of Geosciences. – 2021. – V. 14. – 1112. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06337-z> .
5. Смоляницкий Б.Н., Данилов Б.Б., Рубцова Е.В. Об определении основных параметров буровой установки с обратной циркуляцией очистного агента // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014. – Т. 2. – № 4. – С. 57-62. – EDN: SAXDDH .
6. Han, X., Song, S., Li, J. Pressure drop characteristics of reverse circulation pneumatic cuttings removal during coal seam drilling // Science Progress. – 2020. – V. 103. – No. 2. – Pp. 1-20. – 003685042092523. <https://doi.org/10.1177/0036850420925235>
7. Данилов Б.Б., Смоляницкий Б.Н. Экспериментальное обоснование процесса транспортирования разрушенного грунта при горизонтальном бурении // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 3. – С. 82-90. – EDN: PDRWQB .
8. Feng, S., Jia, W., Yan, J. *et al.* A new method of flow blockage collapsing in the horizontal pipe: the pipe-rotation mechanism // International Journal of Chemical Reactor Engineering. – 2020. – V. 18. – No. 8. <https://doi.org/10.1515/ijcre-2020-0073>
9. Zhang, H., Zhang, O., Li, B. *et al.* Effect of drill pipe rotation on gas-solid flow characteristics of negative pressure pneumatic conveying using CFD-DEM simulation // Powder Technology. – 2021. – V. 387. – Pp. 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.04.017>
10. Li, B., Zhang, H., Wei, J. *et al.* Coal particle transport behavior in a rotating drill pipe used for negative pressure pneumatic conveying // Powder Technology. – 2022. – V. 402. – 117369. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117369>
11. Хан Г.Н., Русин Е. П. Численное моделирование процесса транспортирования породной массы по вращающемуся трубопроводу // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2021. – Т. 2. – №4. – С. 141-150. – <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-2-4-141-150> .
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615760 РМ2D / Хан Г.Н., Ланис А.Л. – Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 22 мая 2015 г.

© Г. Н. Хан, Е. П. Русин, 2023