

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ПОРОДНОЙ МАССЫ ПО ВРАЩАЮЩЕМУСЯ ТРУБОПРОВОДУ

Гил Нам Хан

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник группы прикладной геомеханики, тел. (383) 205-30-30, доп. 193, e-mail: khan.igd@gmail.com

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

Численно методом дискретных элементов исследовано влияние угловой скорости вращающейся вокруг своей продольной оси горизонтальной трубы и формы ее поперечного сечения на эффективность пневмотранспортирования по ней сыпучего материала. В качестве условия эффективного пневмотранспортирования принимается нахождение в поперечном сечении трубы в течение одного ее оборота максимального количества бесконтактных, то есть не контактирующих с другими частицами материала и с трубой, частиц. Предложен метод поиска бесконтактных частиц, позволяющий подсчитывать их количество при фиксированных углах поворота трубы в процессе ее вращения. Для различных форм поперечного сечения определены оптимальные угловые скорости, при которых среднее число бесконтактных частиц в сечении максимально. Результаты исследования могут быть использованы для повышения производительности выноса продуктов разрушения при бурении горизонтальных скважин в горных породах и грунтах.

Ключевые слова: бурение, буровая мелочь, пневмотранспорт, вращающийся трубопровод, метод дискретных элементов, бесконтактные частицы

NUMERICAL SIMULATION OF THE BROKEN ROCK MASS TRANSPORTATION IN A ROTATING PIPELINE

Guil Nam Khan

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. 193, e-mail: khan.igd@gmail.com

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 impact of the angular velocity of a horizontal pipe rotating around its longitudinal axis and the shape of its cross-section on the efficiency of pneumatic conveying of bulk material in it has been numerically investigated by the discrete elements method. The maximum number of non-contact particles, that is, particles being not in contact with other material particles and with the pipe, in the cross

section of the pipe during one its revolution, is assumed the condition for effective pneumatic conveying. A method for searching for non-contact particles is proposed, which makes it possible to calculate their number at fixed pipe position angles during its rotation. For various cross-sectional shapes, the optimal angular velocities are determined at which the average number of non-contact particles in the cross-section is maximum. The results of the study can be used to increase the productivity of the removal of products of destruction when drilling horizontal boreholes in rocks and soils.

Keywords: drilling, drill cuttings, pneumatic transport, rotating pipe, discrete element method, non-contact particles

Введение

При бурении скважин в горных породах и грунтах важно обеспечить эффективное удаление продуктов разрушения из скважины. Недостаточная производительность выноса буровой мелочи приводит к заштыбовке забоя скважины, ухудшению процесса скола (резания) породы, ее переизмельчению с одновременным интенсивным износом инструмента, повышению энергоемкости и снижению механической скорости бурения. Также может произойти закупоривание шланготранспортного тракта и, как следствие, остановка процесса бурения [1]. При вертикально направленном бурении удаление выбуренных частиц не представляет особой сложности благодаря небольшой площади для скопления шлама и движению транспортирующей фазы в направлении противоположном гравитации [2]. Процесс существенно затрудняется в случае бурения горизонтальных скважин [2–7], особенно в грунтах [8, 9].

Вращение горизонтально расположенной транспортной магистрали вокруг собственной продольной оси значительно улучшает перемещение материала в ней. При этом для каждого набора условий бурения существует оптимальный диапазон скорости вращения, в котором обеспечивается наибольшая производительность транспортирования частиц [10–14]. В этом отношении важна также форма поперечного сечения трубопровода, поскольку она влияет на характеристику потока транспортирующей фазы [15, 16] и на распределение частиц в нем.

Именно поэтому возникла задача исследовать влияние формы поперечного сечения и скорости вращения трубопровода на эффективность транспортирования частиц сыпучего материала в нем.

Метод исследования и постановка задачи

Численное исследование в данной работе ведется в плоской постановке с использованием разработанной в ИГД СО РАН компьютерной программы PM2D [17], основанной на методе дискретных элементов с линейной вязко-упругой моделью взаимодействия частиц сыпучего материала [18–21]. Моделируется вращение горизонтальных труб вокруг собственной продольной оси. Для труб с различными формами поперечного сечения определяются скорости вращения, при которых в поперечном сечении в течение одного оборота находится максимальное количество бесконтактных, то есть не контактирующих с другими частицами материала и с трубой, частиц. Считается, что при выполнении этого условия про-

изводительность пневмотранспортирования сыпучего материала максимальна. В расчетах частица считается бесконтактной, если минимальный зазор δ между ней и окружающими ее соседями составляет не менее 1 % от ее размера. Связано это с тем, что при меньшем значении зазора δ в течение вращения трубы бесконтактные частицы вступают в контакт с другими частицами, переходя в контактное состояние, и находятся в нем большую часть времени.

На рис. 1 приведены различной формы поперечные сечения труб (плоские емкости), на 30% заполненные сыпучим материалом Ω . Размеры квадратного, прямоугольного и эллиптического сечений выбраны из условия, что они вписываются в круглое сечение радиусом r . Материал Ω моделируется совокупностью N частиц – дискретных элементов (ДЭ) Ω_i ($i = 1, 2, \dots, N$). Под ними понимаются цилиндры единичной высоты, оси которых ортогональны плоскости Oxy в выбранной декартовой системе координат $Oxyz$, начало O которой совмещено с центром масс емкости. Плоскость Oxy проходит через центры масс Ω_i , ось Oz направлена перпендикулярно плоскости рисунка. Каждой частице Ω_i с радиусом r_i присваиваются физико-механические характеристики: плотность ρ_i , модуль упругости E_i , угол контактного трения φ_i и коэффициент e_i восстановления скорости частицы.

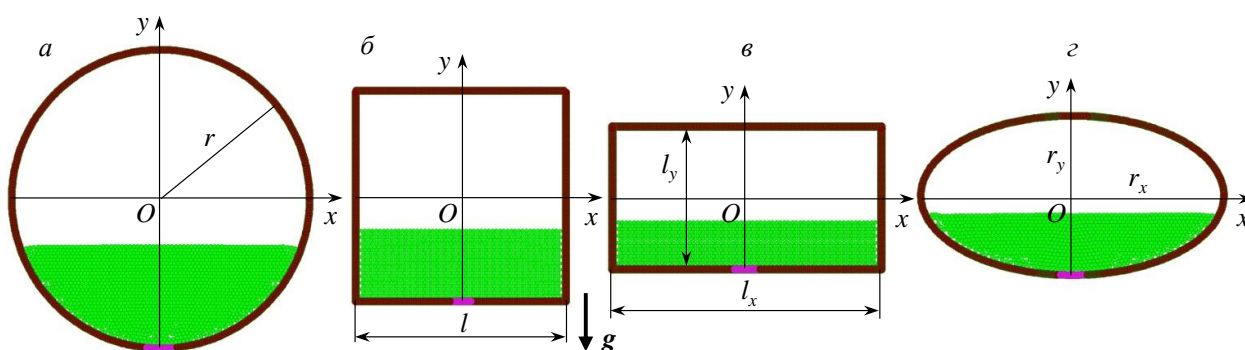


Рис. 1. Начальные положения плоских емкостей, на 30% заполненных сыпучим материалом:

a – окружность радиусом r ; b – квадрат со стороной l ; v – прямоугольник со сторонами l_x, l_y ; z – эллипс с полуосями r_x и r_y ; g – ускорение свободного падения

Емкости моделируются граничными дискретными элементами (ГДЭ) радиусом r_b . Отличаются они от ДЭ тем, что на них задаются краевые условия:

$$\omega_{bj} = \omega, \quad (1)$$

где ω_{bj} – угловая скорость ГДЭ относительно оси Oz , $j = 1, \dots, N_b$, N_b – число ГДЭ; ω – константа. При этом с угловой скоростью ω вокруг оси Oz вращаются все точки граничных дискретных элементов, а не только их центры. Ускорение свободного падения g направлено против оси Oy .

Результаты численного моделирования и их обсуждение

Во всех приведенных ниже расчетах радиус и физико-механические характеристики ДЭ приняты следующими: $r_i = 1.25$ мм, $\rho_i = 2500$ кг/м³; $E_i = 10$ ГПа; $\varphi_i = 26^\circ$; $e_i = 0.3$. Радиус r_b ГДЭ принят равным 2.50 мм; расстояние между соседними ГДЭ выбрано равным 1.25 мм, т.е. они накладываются друг на друга. Сделано это для уменьшения неровностей границы емкости, созданной граничными дискретными элементами. Физико-механические характеристики ГДЭ выбраны теми же, что и у ДЭ. Расчеты проводились с угловыми скоростями ω от 1 до 3 об/с с интервалом 0.5 об/с. Размеры емкостей круглой, квадратной, прямоугольной и эллиптической формы приняты следующими: $r = 100$ мм; $l = 2r/\sqrt{2}$; $l_x = 2r/\sqrt{1.25}$, $l_y = 0.5l_x$; $r_x = r$, $r_y = 0.5r_x$. При заданных значениях размеров квадратная, прямоугольная и эллиптическая емкости вписываются в круглую емкость.

На рис. 2 показаны положения частиц материала и их векторы скорости на стадии поворота емкостей различной формы на угол $\alpha = 120^\circ$.

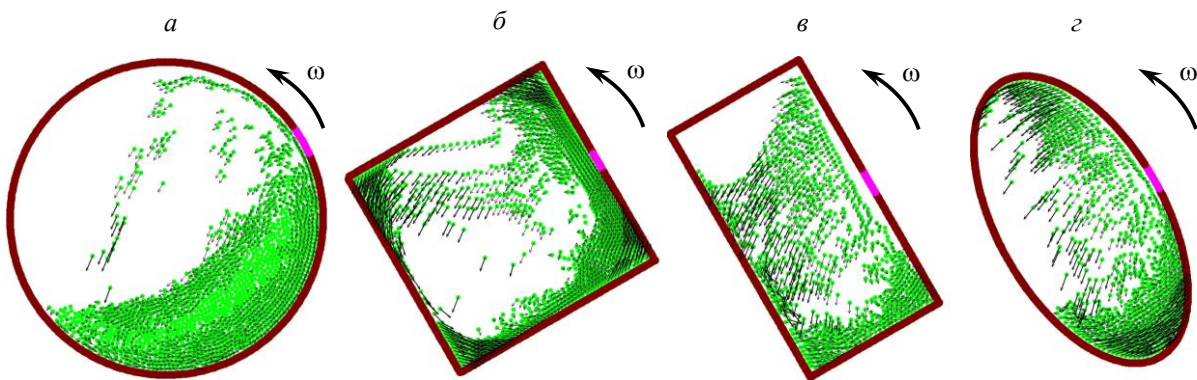


Рис. 2. Поля линейных скоростей частиц сыпучего материала в плоских емкостях различной формы с оптимальными для них угловыми скоростями ω при $\alpha = 120^\circ$: $a - \omega = 2.5$ об/с; $b - \omega = 2.0$ об/с; $v - \omega = 1.5$ об/с; $z - \omega = 2.0$ об/с

Приведенным на рис. 2 картинам деформирования сыпучего материала соответствуют угловые скорости емкостей: $\omega = 2.5$ об/с для круглой; $\omega = 2.0$ об/с для квадратной; $\omega = 1.5$ об/с для прямоугольной; $\omega = 2.0$ об/с для эллиптической. Из расчетов следует, что в данных случаях число частиц, в среднем в течение всего процесса вращения находящихся в бесконтактном состоянии, максимально. Это подтверждают графики и таблица, приведенные ниже.

На рис. 3 представлены графики зависимости относительного числа $n = 100 N_a / N$ (%) бесконтактных частиц от угла α поворота круглой, квадратной, прямоугольной и эллиптической формы емкостей при их оптимальных угловых скоростях ω . Здесь N_a – число бесконтактных частиц, N – число всех частиц сыпучего материала. Из рис. 3 следует, что в среднем в течение одного оборота ем-

кости наибольшего значения число n достигает при разных угловых скоростях ω для емкостей различной формы: $\omega = 2.5$ об/с для круглой; $\omega = 2.0$ об/с для квадратной; $\omega = 1.5$ об/с для прямоугольной; $\omega = 2$ об/с для эллиптической.

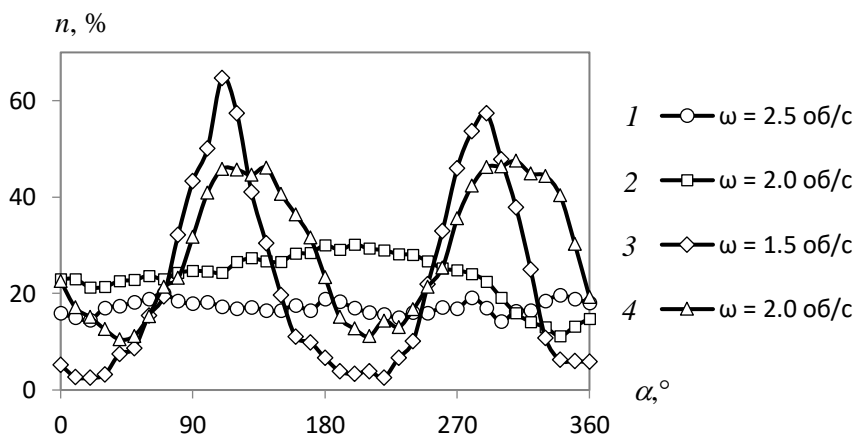


Рис. 3. Распределение относительного числа n бесконтактных частиц в диапазоне от 0 до 360° угла поворота α емкостей различной формы при их оптимальных угловых скоростях ω :

1 – окружность; 2 – квадрат; 3 – прямоугольник; 4 – эллипс

В круглой емкости распределение относительного числа n бесконтактных частиц в течение ее полного оборота примерно равномерное. Связано это с тем, что окружность имеет бесконечное число осей симметрии, а небольшие отклонения n от его среднего значения вызваны периодическим проскальзыванием сыпучего материала по внутренней поверхности емкости.

В квадратной емкости распределение числа n более неравномерное, чем в круглой емкости. Происходит это из-за того, что в квадратной емкости четыре оси симметрии, и при ее вращении углы квадрата служат опорой для сыпучего материала и не позволяют ему проскальзывать по поверхности емкости при больших ее углах поворота, чем в емкости круглой формы на участках подъема материала. Соответственно срыв сыпучего материала с поверхности квадратной емкости происходит более интенсивно, чем в круглой емкости.

В прямоугольной емкости распределение числа n еще более неравномерное, чем в квадратной емкости. Максимальных своих значений $\sim 60\%$ достигает оно при угловой скорости $\omega = 1.5$ об/с и угле поворота емкости $\alpha \approx 110^\circ$ и $\alpha \approx 290^\circ$, т.е. после достижения длинной стороной емкости вертикального положения, когда частицы сыпучего материала начинают интенсивно отделяться от длинной стенки емкости (рис. 2в). При приближении длинной стороны к горизонтальному положению происходит консолидация сыпучего материала и соответственно уменьшается доля бесконтактных частиц.

В эллиптической емкости с соотношением полуосей $r_x/r_y = 2$ число n достигает своих пиковых значений $\sim 45\%$ при $\omega = 2.0$ об/с и угле поворота емкости $\alpha \approx 110^\circ$ и $\alpha \approx 290^\circ$, т.е. примерно при тех же значениях α , что и в прямоугольной емкости. Несмотря на то, что пиковые значения числа n в эллиптической емкости меньше, чем в прямоугольной емкости, в среднем число n на всем интервале угла поворота α от 0 до 360° больше в эллиптической емкости из-за более широкого диапазона относительно больших значений n на всем интервале значений угла α .

Данное утверждение подтверждает табл. 1, в которой приведены средние значения n_c относительного числа бесконтактных частиц, находящихся в емкости в течение одного ее оборота, вычисленные по формуле

$$n_c = \sum_{i=1}^k (n_i)/k, \quad (2)$$

где $k = 37$ – количество замеров относительного числа $n_i = N_{ai}/N$, N_{ai} – число бесконтактных частиц при $\alpha = \alpha_i$, α_i – угол поворота емкости от 0 до 360° с интервалом 10° . В табл. 1 добавлены результаты расчетов, проведенных с двумя эллиптическими емкостями с полуосями $r_x = 100$ мм, $r_y = 25$ мм и $r_x = 100$ мм, $r_y = 75$ мм соответственно. В табл. 1 жирным шрифтом выделены максимальные значения n_c , равные 17.1, 23.5, 22.0, 19.4, 28.8, 20.3 % для круглой, квадратной, прямоугольной и трех эллиптической формы емкостей при угловых скоростях ω , равных 2.5, 2.0, 1.5, 1.5, 2.0, 2.5 об/с соответственно. Из найденных n_c максимального своего значения в 28.8 % достигает в эллиптической емкости с полуосями $r_x = 100$ мм и $r_y = 50$ мм, вращающейся с угловой скоростью $\omega = 2.0$ об/с.

Таблица 1

Средние значения n_c относительного числа бесконтактных частиц во вращающейся емкости различной формы

ω , об/с	n_c , %					
	Окружность $r = 100$ мм	Квадрат $l = 70$ мм	Прямоугольник $l_x = 90$ мм $l_y = 45$ мм	Эллипс $r_x = 100$ мм $r_y = 25$ мм	Эллипс $r_x = 100$ мм $r_y = 50$ мм	Эллипс $r_x = 100$ мм $r_y = 75$ мм
1.0	4.9	9.5	11.0	12.5	5.8	4.4
1.5	7.6	20.5	22.0	19.4	18.5	8.8
2.0	12.2	23.5	14.1	11.8	28.8	18.5
2.5	17.1	1.1	0.9	4.3	6.2	20.3
3.0	0.9	0.0	0.5	0.5	2.3	0.7

В трубах с подобными формами поперечных сечений значения n_c , приведенные в табл. 1, будут соответствовать угловым скоростям ω_s , равным:

$$\omega_s = \omega \sqrt{d/d_s}, \quad (3)$$

где d, d_s – характерные линейные размеры рассмотренных в данной работе сечений трубы и подобных им соответственно. На рис. 4 приведены расположения частиц сыпучего материала и векторы их линейных скоростей в подобных эллиптических емкостях при одном и том же угле их поворота $\alpha = 120^\circ$. Характерный линейный размер d_s правой емкости (рис. 4б) в четыре раза больше, чем размер d у левой емкости (рис. 4а). Для удобства сравнения на рис. 4 обе емкости приведены к одному масштабу. В соответствии с соотношением (3), в расчетах угловая скорость ω_s правой емкости принята в два раза меньшей, чем скорость вращения ω левой емкости. В сравниваемых емкостях частицы в среднем расположены в подобных точках пространства, а направления линейных скоростей частиц в них одинаковы.

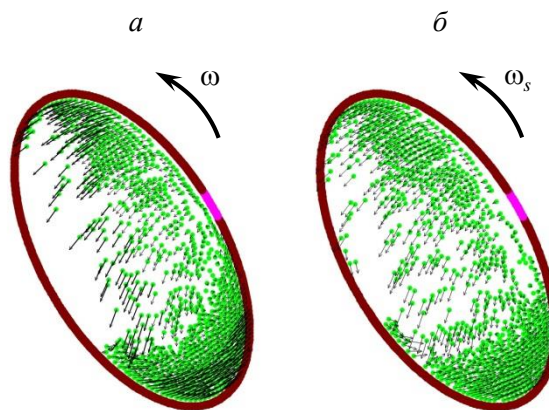


Рис. 4. Поля линейных скоростей частиц сыпучего материала в эллиптических емкостях с полуосями:

$r_x = 100$ мм, $r_y = 50$ мм (а); $r_x = 400$ мм, $r_y = 200$ мм (б – масштаб относительно а уменьшен в четыре раза); $\omega = 2$ об/с; $\omega_s = 1$ об/с

Таким образом, табл. 1 и соотношение (3) позволяют найти оптимальную угловую скорость труб с поперечными сечениями, подобными рассмотренным в данной работе, для эффективного пневмотранспортирования сыпучего материала по ним.

Заключение

Проведенные исследования показали, что производительность пневмотранспортирования сыпучего материала во вращающейся вокруг собственной продольной оси горизонтальной трубе становится максимальной при определенной ее угловой скорости, которая считается оптимальной. Предложен метод ее определения, который заключается в подсчете числа бесконтактных частиц на дискретных стадиях вращения трубы и усреднении этих чисел за время полного оборота трубы. Оптимальная скорость вращения различна у труб, отличающихся формой поперечного сечения. Среди рассмотренных в данном исследовании наилучшей с точки зрения производительности пневмотранспортирования является эллиптическая форма с соотношением полуосей, равном двум. Результаты

исследования позволяют находить оптимальные угловые скорости для труб с формами поперечного сечения подобными рассмотренным в данной работе.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тымчур А. Д. К вопросу улучшения пневмотранспорта выбуренных частиц при бурении взрывных скважин на карьерах // Известия УГГУ. – 2000. – № 11. – С. 277–279.
2. Pedrosa, C., Saasen, A., Ytrehus, J.D. Fundamentals and Physical Principles for Drilled Cuttings Transport—Cuttings Bed Sedimentation and Erosion // *Energies*. – 2021. – No. 14. – P. 545.
3. Zhu, X, Shen, K., Li, B., Lv, Y. Cuttings Transport Using Pulsed Drilling Fluid in the Horizontal Section of the Slim-Hole: An Experimental and Numerical Simulation Study // *Energies*. – 2019. – No. 12. – P. 3939.
4. Hakim, H., Katende, A., Sagala, F. et al. Performance of polyethylene and polypropylene beads towards drill cuttings transportation in horizontal wellbore // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 165. – Pp. 962–969.
5. Zeng, C., Yan, X., Zeng, Z., Yang, S. The formation and broken of cuttings bed during reaming process in horizontal directional drilling // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2018. – Vol. 76. – Pp. 21–29.
6. Liu, W., Zhu, X., Jing, J. The analysis of ductile-brittle failure mode transition in rock cutting // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 163. – Pp. 311–319.
7. Liu, W., Qian, X., Li, T. et al. Investigation of the tool-rock interaction using Drucker-Prager failure criterion // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 173. – Pp. 269–278.
8. Данилов Б. Б., Кондратенко А. С., Смоляницкий Б. Н., Смоленцев А. С. Совершенствование технологии проходки скважин в грунте методом продавливания // ФТПРПИ. – 2017. – № 3. – С. 57–64.
9. Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н., Шер Е. Н. Определение условий транспортирования пластичного грунта сжатым воздухом по горизонтальному трубопроводу при бурении скважин // ФТПРПИ. – 2014. – № 3. – С. 66–74.
10. Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н. Экспериментальное обоснование процесса транспортирования разрушенного грунта при горизонтальном бурении скважин // ФТПРПИ. – 2012. – № 3. – С. 82–90.
11. Feng, S., Jia, W., Yan, J., Wang, C., Zhang, K. A new method of flow blockage collapsing in the horizontal pipe: the pipe-rotation mechanism // *International Journal of Chemical Reactor Engineering*. – 2020. – Vol. 18. – No. 8.
12. Jia W, Feng S. Study on mass at the bottom of the pipe and gas velocity distribution during flow blockage collapsing under pipe-rotation mechanism // *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*. – 2020. – Vol. 15. – No. 6.
13. Han, X., Li, P., Li, J. CFD-DEM Simulation of Reverse Circulation Pneumatic Cuttings Removal during Coal Seam Drilling // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2020. – Article ID 3707864. – 14 p.
14. Hongtu, Z., Ouya Z., Botao, L. et al. Effect of drill pipe rotation on gas-solid flow characteristics of negative pressure pneumatic conveying using CFD-DEM simulation // *Powder Technology*. – 2021. – Vol. 387. – Pp. 48–60.
15. Fokeer, S., Lowndes, I.S., Hargreaves, D.M. Numerical modelling of swirl flow induced by a three-lobed helical pipe // *Chemical Engineering and Processing*. – 2010. – Vol. 49. – Pp. 536–546.
16. Daschiel, G., Krieger, V., Jovanović, J., Delgado, A. Numerical simulation of turbulent flow through Schiller's wavy pipe // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2014. – Vol. 761. – Pp. 241–260.

17. 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.
18. Cundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies // *Geotechnique*. – 1979. – Vol. 29. – No. 1. – Pp. 47 – 65.
19. Schäfer, J., Dippel, S., Wolf, D.E. Force schemes in simulations of granular materials // *Journal de Physique I France*. – 1996. – Vol. 6. – No. 1. – Pp. 5–20.
20. Kruggel-Emden, H., Simsek, E., Rickelt, S., et al. Review and extension of normal force models for the Discrete Element Method // *Powder Technology*. – 2007. – Vol. 171. – No. 3. – Pp. 157–173.
21. Хан Г.Н. О несимметричном режиме разрушения массива горных пород в окрестности полости // *Физическая мезомеханика*. – 2008. – Т.11. – №1. – С.109–114.

REFERENCES

1. Tymchur, A.D. (2000) К вопросу улучшения пневмотранспорта выбуренных частиц при бурении взрывных скважин на карьерах [On the issue of improving the pneumatic transport of drilled particles when drilling blast holes in open pits] *Izvestiya UGGU*, 11, 277–279. [In Russian] .
2. Pedrosa, C., Saasen, A., Ytrehus, J.D. (2021) Fundamentals and Physical Principles for Drilled Cuttings Transport – Cuttings Bed Sedimentation and Erosion. *Energies*, 14, 545.
3. Zhu, X, Shen, K., Li, B., Lv, Y. (2019) Cuttings Transport Using Pulsed Drilling Fluid in the Horizontal Section of the Slim-Hole: An Experimental and Numerical Simulation Study. *Energies*, 12, 3939.
4. Hakim, H., Katende, A., Sagala, F. et al. (2018) Performance of polyethylene and polypropylene beads towards drill cuttings transportation in horizontal wellbore. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 165, 962–969.
5. Zeng, C., Yan, X., Zeng, Z., Yang, S. The formation and broken of cuttings bed during reaming process in horizontal directional drilling. *Tunneling and Underground Space Technology*, 76, 21–29.
6. Liu, W., Zhu, X., Jing, J. (2018) The analysis of ductile-brittle failure mode transition in rock cutting. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 163, 311–319.
7. Liu, W., Qian, X., Li, T. et al. (2019) Investigation of the tool-rock interaction using Drucker-Prager failure criterion. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 173, 269–278.
8. Danilov, B.B., Kondratenko, A.S., Smolyanitsky, B.N., Smolentsev A.S. (2017) Improvement of Pipe Pushing Method. *Journal of Mining Science*, 53, 478–483.
9. Danilov, B.B., Smolyanitsky, B.N., Sher, E.N. (2014) Determination of conditions for compressed air-assisted removal of plastic soil in horizontal pipeline in drilling. *Journal of Mining Science*, 50, 484–490.
10. Danilov, B.B., Smolyanitsky, B.N. (2012) Experimental substantiation of broken soil transportation in horizontal borehole drilling. *Journal of Mining Science*, 48, 480–486.
11. Feng, S., Jia, W., Yan, J., Wang, C., Zhang, K. (2020) A new method of flow blockage collapsing in the horizontal pipe: the pipe-rotation mechanism. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 18(8).
12. Jia W, Feng S. (2020) Study on mass at the bottom of the pipe and gas velocity distribution during flow blockage collapsing under pipe-rotation mechanism. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 15 (6).
13. Han, X., Li, P., Li, J. (2020) CFD-DEM Simulation of Reverse Circulation Pneumatic Cuttings Removal during Coal Seam Drilling. *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 3707864, 14.
14. Hongtu, Z., Ouya Z., Botao, L. et al. (2021) Effect of drill pipe rotation on gas-solid flow characteristics of negative pressure pneumatic conveying using CFD-DEM simulation. *Powder Technology*, 387, 48–60.

15. Fokeer, S., Lowndes, I.S., Hargreaves, D.M. (2010) Numerical modeling of swirl flow induced by a three-lobed helical pipe. *Chemical Engineering and Processing*, 49, 536–546.
16. Daschiel, G., Krieger, V., Jovanović, J., Delgado, A. (2014) Numerical simulation of turbulent flow through Schiller's wavy pipe, *Journal of Fluid Mechanics*, 761, 241–260.
17. Certificate of State Registration (Russia) of computer program No. 2015615760 PM2D / Khan, G.N., Lanis, A.L. – Date of state registration in the Register of Programs for Computers May 22, 2015.
18. Cundall P.A., Strack O.D.L. (1979) A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29(1), 47 – 65.
19. Schäfer, J., Dippel, S., Wolf, D.E. (1996) Force schemes in simulations of granular materials. *Journal de Physique I France*, 6(1), 5–20.
20. Kruggel-Emden, H., Simsek, E., Rickelt, S., et al. (2007) Review and extension of normal force models for the Discrete Element Method. *Powder Technology*, 171 (3), 157–173.
21. Khan, G.N. (2008). Asymmetric failure of the rock mass near a hollow [O nesimmetrichnom rezhime razrusheniya massiva gornyh porod v okrestnosti polosti]. *Physical Mesomechanics [Fizicheskaya mezomekhanika]*, 11(10), 109-114. [in Russian].

© Г. Н. Хан, Е. П. Русин, 2021