

К ОБОСНОВАНИЮ КОНСТРУКЦИИ БУНКЕРА-НАКОПИТЕЛЯ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОГО ОБЪЕМНОГО ДОЗАТОРА

Гил Нам Хан

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 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

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

В работе обосновывается конструкция одного из основных узлов высокоточного объемного дозатора сыпучих материалов – его бункера-накопителя. Установлено, что конструктивная схема данного узла должна гарантированно исключать вероятность образования завесаний перерабатываемого продукта и обеспечивать сохранение материалом при движении к очагу дозирования достаточно однородной плотной упаковки. Численно методом дискретных элементов исследован процесс течения сыпучего материала в бункере-накопителе. Сделан вывод о том, что он должен быть выполнен осесимметричным, с бездефектными стенками и расширяющимся под углом $2-4^\circ$ к своему основанию.

Ключевые слова: сыпучие материалы, объемное дозирование, точность, бункер-накопитель, метод дискретных элементов.

TO THE SUBSTANTIATION OF THE storage BUNKER DESIGN FOR A HIGH-ACCURACY VOLUMETRIC DOSING DEVICE

Guil Nam Khan

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Senior Researcher, Applied Geomechanics Group, phone: (383)205-30-30, extension 193, e-mail: khan.igd@gmail.com

Evgeny P. Rusin

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

The paper substantiates the design of one of the main components of a high-precision volumetric dosing device for bulk materials – its storage hopper. It is determined that hopper structural design should avoid possible hang-ups of the product processed and maintain rather uniform dense packing of the material on its way to the dosing area. The process of bulk material flow in a storage hopper was studied numerically by discrete element method. It is concluded that hopper design should be axially symmetric, with defect-free walls, and expanding at an angle of $2-4^\circ$ to its base.

Key words: bulk materials, volumetric dosing, precision, storage hopper, discrete element method.

Введение

Операция дозированной подачи измельченных продуктов – неотъемлемый элемент многих технологических процессов горно-металлургической промышленности. К таким относятся: в обогащении минерального сырья – приготовление растворов флокулянтов для обезвоживания концентратов, очистки оборотной воды и стоков [1], обработка руд ускоренными электронами [2]; в порошковой металлургии – подача отдельных составляющих в технологическую линию при получении твердых сплавов [3, 4] и др. Необходимость дозирования мелкофракционных веществ существует также в шинной промышленности, при производстве строительных материалов, в пищевой, химической, фармацевтической отраслях и т.д. Точностью рассматриваемой операции, в значительной степени, определяются качество готовой продукции и расход исходных компонентов. Существуют два основных способа их дозирования – весовой и объемный. Наиболее точным является первый, но устройства для его реализации малопроизводительны и, из-за сложности конструкции, относительно дороги. Объемный способ более производителен, осуществляется с использованием менее сложного и дорогостоящего оборудования, однако во многих случаях не отвечает запросам технологии по своей точности [5-8]. Трудность ее повышения обусловлена недостаточной изученностью особенностей напряженно-деформированного состояния (НДС) сыпучих сред при взаимодействии с элементами уже существующих и разрабатываемых дозирующих систем. При создании новых устройств этого класса, как правило, опираются на предшествующий опыт и интуицию. Особенно остро проблема объемного дозирования стоит в случае склонных к зависаниям и слеживанию порошков. В [9] сформулированы подходы к решению этой задачи; на их основе, а также с учетом эмпирических данных и результатов анализа существующих конструкций, предназначенных для работы с такими продуктами, в ИГД СО РАН предложена схема нового устройства [10]. Многолетняя промышленная эксплуатация объемных дозаторов, выполненных по этой схеме и выпускавшихся в 1990-е годы серийно, подтвердила ее эффективность.

Одним из основных конструктивных элементов дозирующего устройства является бункер-накопитель, из которого перерабатываемый материал поступает к дозирующему узлу. В настоящем исследовании с привлечением численного моделирования обосновывается выбор конструкции бункера-накопителя для высокоточного объемного дозатора ИГД.

Общие положения

Добиться повышения точности объемного дозирования порошков, включая трудносыпучие (далее также сыпучие материалы, просто сыпучие или материалы), исходя только из конструктивных соображений, невозможно. Для этого требуется понимание процессов, происходящих с продуктом переработки в областях его взаимодействия с главными элементами дозирующих устройств.

Как показывают экспериментальные исследования, одним из основополагающих условий точной дозировки порошковых материалов становится постоянство их плотности в очаге реализации данной операции. Зависит этот параметр от процессов, которые развиваются не только собственно в области очага, но и в накопительной части конструкции. Обеспечить в них выполнение данного требования в принципе возможно как для рыхлых материалов, так и имеющих начальную плотную упаковку. Зачастую предпочтение отдается их предварительному разуплотнению. Это увеличивает подвижность перерабатываемого продукта и до некоторой степени снижает остроту проблемы его зависаний в системе дозирования. Однако, воздействие на некомпактную среду промышленных вибрации и ударных нагрузок приводит к непостоянству скорости движения сыпучего в накопителе и колебаниям в нем его плотности, что негативно сказывается на точности обсуждаемой операции. Те же материалы при более высокой плотности менее чувствительны к внешним воздействиям. Тем не менее при этом существенно возрастает опасность образования в бункере устойчивых сводов и зависаний. Отсюда встает вопрос, какой из двух перечисленных вариантов с инженерной точки зрения и не в ущерб функциональной стабильности и надежности дозирующей системы предпочтительнее. Анализ известных для них решений [5, 6] и собственные исследования в области механики сыпучих сред [11, 12] убеждают в перспективности второго из этих направлений. С учетом изложенного выше, конструктивная схема накопителя высокоточных объемных дозаторов должна гарантированно исключать вероятность образования зависаний перерабатываемого продукта и обеспечивать сохранение материалом при движении к очагу дозирования достаточно однородной плотной упаковки.

К выбору конструкции накопителя

Как правило, стандартная схема бункера-накопителя сыпучего материала у устройств рассматриваемого типа состоит из верхней цилиндрической или усеченной конической (слабо расширяющейся либо сужающейся книзу) емкости, основание которой оснащено хоппером – воронкой или сходящимся каналом [13]. Наряду с функцией накопления им обеспечивается передача продукта в технологическую линию. Результаты [14-19] показывают насколько негативно на напряженно-деформированном состоянии сыпучих материалов может сказываться область сопряжения этих элементов и форма канала. Их следствием становятся колебания плотности материала в емкости, образование в сходящейся части временных зависаний и трудноустраняемых устойчивых сводов из него, скачки напряжений. Ситуация с НДС сыпучего намного осложняется, если горизонтальные сечения воронки (и бункера) не изометричные, а квадратные или прямоугольные. Данного перечня достаточно, чтобы ее использование в качестве конструктивного элемента емкости-накопителя дозаторов изначально исключить из рассмотрения. Сходящийся канал в них может быть применен только как сборник, которым после операции дозирования материал в устрой-

стве группируется в струю для трансляции далее в технологическую цепь. Именно в таком качестве хоппер использован в [10]. Таким образом, емкость-накопитель сыпучих материалов дозирующих устройств рассматриваемого типа целесообразно выполнять в виде одной из перечисленных выше осесимметричных емкостей, полностью отказавшись от их оснащения накопительной воронкой. Как показывают собственные исследования [9] и работы [5, 6], это целесообразно также и по той причине, что к бункеру такой конструкции достаточно легко адаптируется дозирующий узел, выполненный по схеме тарельчатого питателя. Несомненными достоинствами последнего являются простота конструкции и эксплуатационная надежность.

Промоделируем в двумерной постановке с использованием модифицированного [20] метода дискретных элементов (МДЭ) [21] изменение деформированного состояния (ДС) сыпучего при смещении по падению в трех типах бункеров: цилиндрическом, сужающемся и расширяющемся к основанию (рис. 1). Жесткие стенки 1, 2 этих высотой $H = 1.5$ м емкостей наклонены под углом α к вертикали. В случаях $\alpha < 0^\circ$ и $\alpha > 0^\circ$ они соответственно сходятся и расходятся книзу (см. рис. 1а, в), при $\alpha = 0^\circ$ данные ограждения параллельны между собой. Ширина L нижнего сечения у этих одинакового объема с углом α равным $-3, 0$ и 3° накопителей, составляет соответственно 0.32, 0.40 и 0.49 м. Их основание оборудовано фиктивным подвижным «технологическим» днищем (поршнем). Исходное положение его рабочей поверхности находится выше основания на величину h . Смещением на нее поршня по падению обеспечивается перемещение в том же направлении находящегося в емкостях над ним высотой $H - h$ столба сыпучего материала.

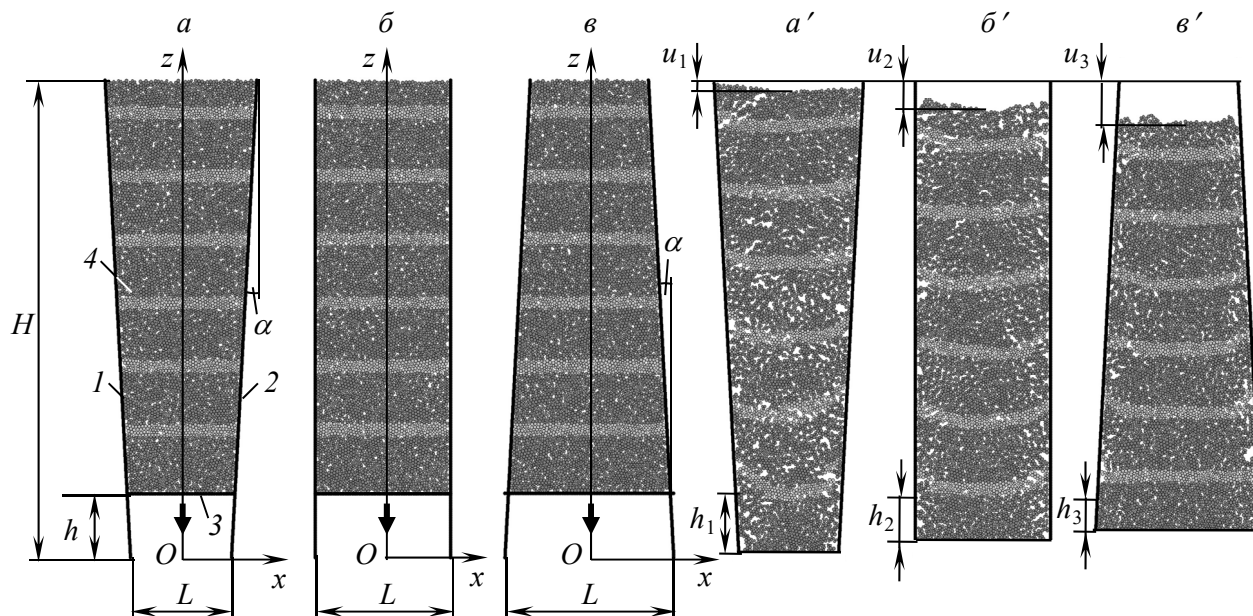


Рис. 1. Начальное (а–в) и конечное (а'–в') ДС сыпучего материала в осевом сечении осесимметричных бункеров с углом α наклона стенок 1, 2: а, а' – $\alpha = -3^\circ$; б, б' – $\alpha = 0^\circ$; в, в' – $\alpha = 3^\circ$.

Заполнены бункеры модельным материалом 4, который состоит из дискретных элементов, представляющих собой цилиндры единичной высоты. Их радиус лежит в диапазоне 0.004–0.005 м. Сгруппированы они по три и четыре элемента в кластеры [22]. Ось цилиндров направлена перпендикулярно плоскости Oxz , в ней же находятся центры их масс. Плотность ρ , модуль упругости E элементов, а также коэффициент трения k и сцепление C между ними равны 2800 кг/м³, 100 ГПа, 0.3 и 5 кПа соответственно. Значение C близко тому, которое имеют такие трудносыпучие порошковые материалы, как цемент, мука и др. [23]. Принято оно восстанавливаемым. Это означает, что виртуальная пружина сцепления между дискретными элементами по достижению в ней предельной деформации прекращает свое действие, при возобновлении контакта между ними – вновь включается в работу. Подвижное днище и стенки бункеров моделируются граничными дискретными элементами ГДЭ [21] радиусом $r = 0.005$ м и с заданными выше физико-механическими параметрами. Расстояние между их центрами составляет 0.0025 м. Краевые условия для них:

$$v_l = (0,0,0), \quad v_r = (0,0,0), \quad v_b = (0,0,-v), \quad \omega_l = (0,0,0), \quad \omega_r = (0,0,0), \quad \omega_b = (0,0,0), \quad (1)$$

где $v_l, \omega_l; v_r, \omega_r; v_b, \omega_b$ – векторы линейной скорости центров граничных дискретных элементов и их угловой скорости, относящихся соответственно к левой, правой стенкам бункера и рабочей поверхности поршня, находящейся в начальный момент времени на уровне h ; $v = 0.1$ м/с. Сила тяжести направлена против оси Oz . Материал в емкостях для визуализации в нем будущих деформационных картин послойно окрашен.

На рис. 1, *a–в* приведено исходное состояние модельной сыпучей среды в рассматриваемых вариантах бункера, на рис. 1*a'–в'* – картины ее деформированного состояния (ДС) после опускания в них поршня на величину $h_1 = 0.19, h_2 = 0.15, h_3 = 0.13$ м соответственно. Во всех вариантах $\Delta V = 0.06$ м² ([м²] – размерность объема в двумерном случае), где ΔV – объем заполняющийся материалом над опускающимся в емкости днищем. Из рис. 1*a'–в'* следует, что при прочих равных условиях в бункерах со сходящимися книзу, параллельными и расходящимися книзу стенками поверхность сыпучего в результате опускания поршня испытывает соответственно оседание u_1, u_2, u_3 , причем $u_1 < u_2 < u_3$. В ходе него, как показывают расчеты, объем V , а отсюда и пористость n материала в накопителях увеличиваются. Наибольшего приращения Δn она достигает в бункере, сходящемся книзу, наименьшего – в расходящемся в том же направлении. Это означает, что в последнем случае, в отличие от двух других, перемещения сыпучего практически не влияют на плотность его начальной упаковки. Те незначительные изменения, которые она при этом терпит, связаны лишь с механическими возмущениями, реализующимися в пристенных слоях оседающего в емкости материала (см. рис. 1*в'*). Отсюда следует, что влияние последнего фактора на плотность среды в бункере можно дополнительно снизить за счет повышения чистоты обработки его внутренней поверхности. Сле-

дует также особо отметить, что она не должна иметь конструктивных впадин и выступов или дефектов такого типа. Даже самые незначительные из них могут приводить к существенным возмущениям в перемещающемся материале и локальным повышением его давления на стенки бункера [24].

Рис. 2 иллюстрирует зависимость $\Delta n = f(\alpha)$ при смещениях модельной среды в ряде накопителей, которые имеют одинаковые высоту, объем и шероховатость внутренней поверхности стенок. Угол α их наклона у соседних емкостей в этом ряду отличается на 1° , крайние в нем имеют $\alpha = -4$ и 4° . Данным углам отвечают значения L , равные соответственно 0.50; 0.49; 0.45; 0.43; 0.40; 0.37; 0.35; 0.32; 0.30 м. Из рис. 2 следует, что возмущения в материале за опускающимся поршнем уменьшаются по мере изменения формы емкостей от сужающейся книзу к расходящейся. Минимальному разуплотнению сыпучее подвергается в бункерах, стенки у которых отклонены от вертикали на угол $\alpha \geq 2^\circ$.

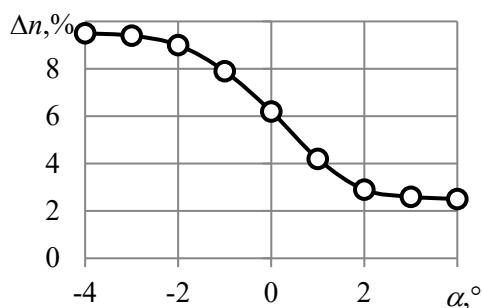


Рис. 2. Зависимость $\Delta n = f(\alpha)$ при смещении материала по падению в емкостях с коэффициентом трения k по стенкам, $V = const$ и углом α от -4 до 4°

Таким образом, численное моделирование позволяет заключить, что рациональным решением для накопителя дозирующих устройств рассматриваемого типа, с точки зрения наименьшего влияния на начальное состояние сыпучего материала в нем, является емкость, расширяющаяся книзу под углом $\alpha = 2-4^\circ$. Ее внутренняя поверхность для сохранения средой, смещающейся по падению, состояния максимально близкого к однородному должна быть качественно обработана и не должна иметь конструктивных впадин и выступов или дефектов такого типа.

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117122090003-2.

Авторы благодарят д.т.н. С.Б. Стажевского за полезное обсуждение материалов работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Небера В. П. Флокуляция минеральных суспензий. – М. : Недра, 1983. – 288 с.
2. Кондратьев С.А., Ростовцев В.И., Бочкарев Г.Р. и др. Научное обоснование и разработка инновационных технологий комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья // ФТПРПИ. – 2014. – № 5. – Стр. 187-202.

3. Фальковский В. А., Клячко Л. И. Твердые сплавы. – М.: Руда и металлы, 2005. – 419 с.
4. Григорьев С.Н., Грибков А.А. Влияние точности дозирования мелкодисперсных и наноразмерных порошковых компонентов твердых сплавов на надежность твердосплавного режущего инструмента // СТИН. – 2010. – № 12. – Стр. 24-26.
5. Орлов С.П. Дозирующие устройства. – М.: Машиностроение, 1966. – 286 с.
6. Глобин А.Н., Краснов И.Н. Дозаторы. – Зерноград: ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2012. – 348 с.
7. Vetter, G. Systematology and accuracy of dosing methods for process components / Vetter, G. (ed.) The dosing handbook. – New York, NY, USA: Elsevier Advanced Tech, 1998. – Pp. 3-44.
8. Kolatac, R. Gravimetric and volumetric feeding of particulate solids. Particulate solids, bin hopper and metering – basic fundamentals. – Proceedings of 1976 National Waste Processing Conference, Boston, MA, May 23-26, 1976. – New York, NY, USA: ASME, 1976.
9. Stazhevsky S.B. The dosing devices for powders. – Proceedings of MatTech '90. The First European East-West Symposium on Materials and Processes, June 10-18, 1990, Finland.
10. А.с. СССР № 1557033. Дозатор сыпучих материалов / Стажевский С.Б., Шемякин Е.И., Крамаджян А.А. и др. // Оpubл. в БИ. – 1990. – № 14.
11. Стажевский С.Б. О первой форме течения сыпучих материалов в бункерах // ФТПРПИ. – 1983. – № 3. – С. 4-21.
12. Стажевский С.Б. О второй форме течения сыпучих материалов в бункерах // ФТПРПИ. – 1985. – № 5. – С. 3-15.
13. Carson, J.W. Hopper/bin design. – McGlinchey, D., ed. Bulk Solids Handling: Equipment Selection and Operation. – Hoboken, NJ, USA: Wiley-Blackwell, 2008. – Pp. 68-98.
14. Ревуженко А.Ф., Стажевский С.Б., Шемякин Е.И. Несимметрия пластического течения в сходящихся осесимметричных каналах // Доклады АН СССР, Москва, 1979, том 246, № 3, стр. 572-574.
15. Стажевский С.Б. Деформирование сыпучих материалов в сходящихся осесимметричных каналах // ФТПРПИ. – 1981. – № 3.
16. Стажевский С.Б. Об особенностях напряженно-деформированного состояния сыпучих материалов в сходящихся каналах и бункерах // ФТПРПИ. – 1986. – № 3.
17. Клишин С.В., Лавриков С.В., Ревуженко А.Ф. Численное моделирование выпуска раздробленного материала методами дискретных элементов и клеточных автоматов / Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: Труды XX Всероссийской конференции с участием иностранных ученых. – Новосибирск: Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 2013. – С. 208–215.
18. Бобряков А.П., Клишин С.В., Косых В.П. и др. PIV-методика для определения поля деформаций при выпуске сыпучих материалов // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2018. – № 4. – С. 343-347.
19. Бабаков, В., Шиманская А. Кинематически возможное несимметричное поле скоростей в задаче о плоском сходящемся канале // ФТПРПИ. – 2011. – № 6. – С. 30-34.
20. Хан Г.Н. О несимметричном режиме разрушения массива горных пород в окрестности полости // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т.11. – № 1.
21. Cundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies // Geotechnique. – 1979. – V.29.
22. Lu M., McDowell G.R. The importance of modeling ballast particle shape in the discrete element method // Granular Matter. – 2007. – N 9.
23. Зимон А.Д. Адгезия пыли и порошков. – М.: Химия, 1976.
24. Скориков Б.А., Стажевский С.Б., Шемякин Е.И. К усилению стен силосов // Строительная механика и расчет сооружений. – 1985. – № 1.

© Г. Н. Хан, Е. П. Русин, 2020