

## **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  $\alpha$  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  $\alpha$  равным  $-3, 0$  и  $3^\circ$  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.

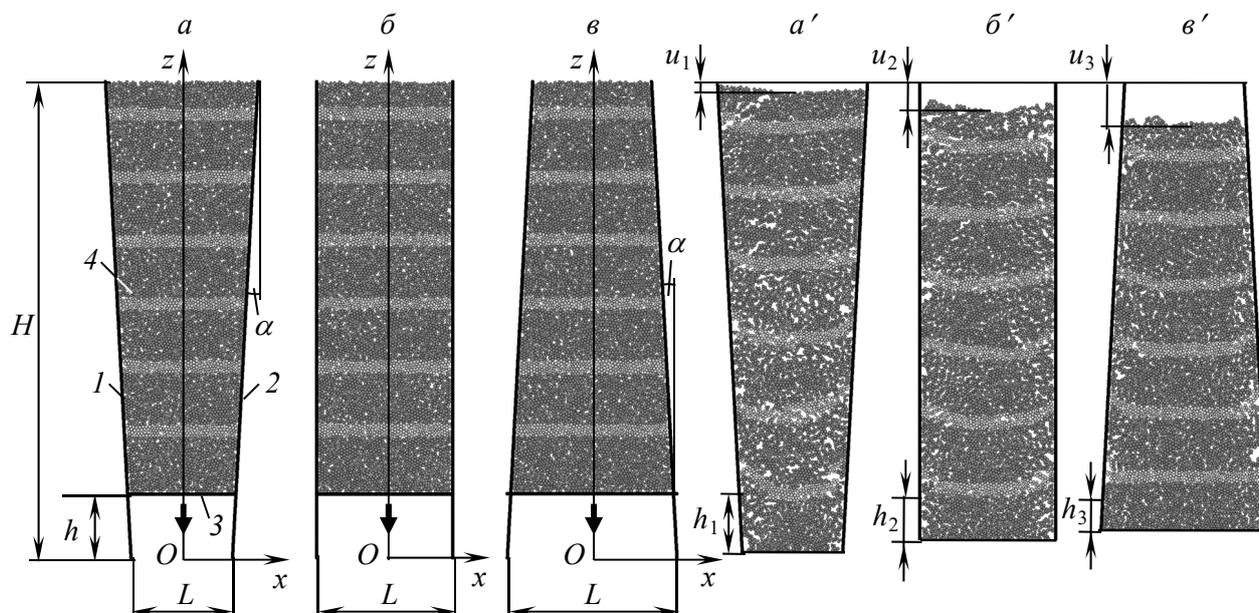


Рис. 1. Начальное (а–в) и конечное (а'–в') ДС сыпучего материала в осевом сечении осесимметричных бункеров с углом  $\alpha$  наклона стенок 1, 2: а, а' –  $\alpha = -3^\circ$ ; б, б' –  $\alpha = 0^\circ$ ; в, в' –  $\alpha = 3^\circ$ .

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  $\rho$ , модуль упругости  $E$  элементов, а также коэффициент трения  $k$  и сцепление  $C$  между ними равны 2800 кг/м<sup>3</sup>, 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  $\Delta V = 0.06$  м<sup>2</sup> ([м<sup>2</sup>] – размерность объема в двумерном случае), где  $\Delta V$  – 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  $\Delta n$  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  $\alpha$  их наклона у соседних емкостей в этом ряду отличается на  $1^\circ$ , крайние в нем имеют  $\alpha = -4$  и  $4^\circ$ . 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  $\alpha \geq 2^\circ$ .

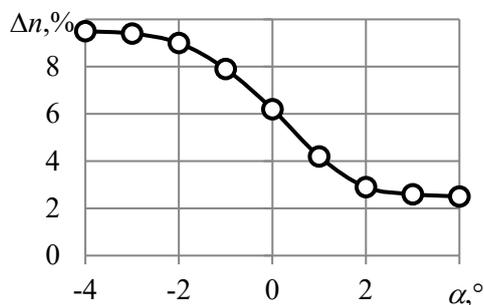


Рис. 2. Зависимость  $\Delta n = f(\alpha)$  при смещении материала по падению в емкостях с коэффициентом трения  $k$  по стенкам,  $V = const$  и углом  $\alpha$  от  $-4$  до  $4^\circ$

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. Стажеского 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