

УДК 539.215: 66.028

КОНСТРУКЦИЯ ВЫСОКОТОЧНОГО ОБЪЕМНОГО ДОЗАТОРА ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е. П. Русин, С. Б. Стажевский, Г. Н. Хан

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

E-mails: gmmlab@isd.ru, stazh@isd.ru, khan.igd@gmail.com

Предложена конструкция узла объемного дозирования трудносыпучих порошков, позволяющая осуществлять подачу продукта с точностью, которая сопоставима с характерной для весовых систем. Численно (методом дискретных элементов) и экспериментально исследована эффективность работы основных узлов. Предложена конструкция высокоточного объемного дозатора непрерывного действия.

Ключевые слова: сыпучие материалы, объемное дозирование, диск, отсекающий, винтовая лопасть, метод дискретных элементов.

DOI: 10.15372/PMTF20220317

Введение. Непрерывная дозированная подача мелкофракционных, подверженных слеживанию и зависаниям материалов — неотъемлемый элемент многих технологических процессов. Точностью дозирования в значительной степени определяются качество готовой продукции и расход исходных трудносыпучих компонентов. Из двух основных способов контролируемой подачи порошков — весового и объемного — точным является первый, однако второй способ имеет высокую производительность и реализуется с использованием менее сложного и дорогостоящего оборудования [1]. В работе [2] предложены подходы к решению задачи повышения его точности, на основе которых для рассматриваемых материалов разработана и внедрена в производство конструкция объемного дозатора непрерывного действия. Основными элементами конструкции являются бункер для накопления перерабатываемого продукта, узел дозирования и выпускная воронка [2].

Точность выполнения рассматриваемым устройством операции дозирования зависит от напряженно-деформированного состояния порошкового материала как непосредственно в области узла дозирования, так и в питающем бункере. В [3] рассмотрена разработанная для трудносыпучих порошков эффективная конструкция бункера. В данной работе с использованием результатов численных и лабораторных экспериментов разработана усовершенствованная конструкция дозирующего узла высокоточного объемного дозатора непрерывного действия.

1. Прототип объемного дозатора. Высокоточными принято считать аппараты, обеспечивающие дозирование сыпучих материалов с погрешностью менее 1 % [1, 4]. Основным элементом объемного дозатора, способного обеспечить такую точность, является тарельчатый питатель [5]. Устройство представляет собой осесимметричный бункер с лож-

Работа выполнена в рамках проекта фундаментальных научных исследований (номер государственной регистрации АААА-А17-117122090003-2).

© Русин Е. П., Стажевский С. Б., Хан Г. Н., 2022

ным днищем в виде закрепленного на вертикальном валу диска, который может иметь одно либо несколько радиальных разгрузочных щелевых окон [5]. Вращение днища инициирует истечение через них сыпучего материала и перемещение его в бункере под действием силы тяжести. Эксперименты показали, что при переработке трудносыпучих порошков со слабым (порядка 5 кПа) сцеплением использование щелевых окон позволяет уменьшить погрешность до 15–20 %. Такой низкий показатель объясняется неконтролируемым характером течения трудносыпучих продуктов через указанные окна.

Для устранения данного недостатка и поддержания постоянного расхода сыпучего материала щелевые окна оснащены наклонным ножом [5]. В рассматриваемом случае размещение ножа над одиночной щелью диска позволило уменьшить показатель погрешности экспериментальной установки до 6–9 %. Механизм взаимодействия узлов дозирования с перерабатываемым продуктом исследован экспериментально и численно с помощью метода дискретных элементов [6], который применяется для решения задач механики гранулированных сред [7–10].

2. Модель трудносыпучего материала. Линейная вязкоупругая модель исследуется с использованием метода дискретных элементов [6, 11]. Трудносыпучий материал моделируется совокупностью частиц — дискретных элементов Ω_i ($i = 1, 2, \dots, N$). В трехмерном случае эти частицы представляют собой шары, в двумерном — цилиндры единичной высоты, оси которых ортогональны плоскости Π , проходящей через центры масс дискретных элементов. Каждой частице Ω_i радиусом r_i присваиваются физико-механические характеристики: плотность ρ_i , модуль упругости E_i , угол контактного трения φ_i , коэффициент восстановления скорости частицы e_i [6, 11], а также сцепление C_i и деформация ε_i^* , при которой происходит разрыв сцепления. Параметры C_i, ε_i^* позволяют включить в модель трудносыпучего материала силы сцепления частиц и максимальное растяжение, при котором происходит разрыв элементов сцепления. Данные элементы представляют собой виртуальную пружину: в трехмерном случае — цилиндр с площадью основания πr_{ij}^2 и высотой $4r_{ij}$ ($r_{ij} = \min(r_i, r_j)$), ось которого проходит через центры частиц; в двумерном — прямоугольник со сторонами длиной $2r_{ij}$ и $4r_{ij}$, лежащий в плоскости Π . Точки контакта на поверхности частиц при их соприкосновении совпадают с геометрическим центром виртуальной пружины. При этом одна ее половина имеет характеристики C_i, ε_i^* , другая — C_j, ε_j^* . Виртуальная пружина сцепления “включается” в работу в момент появления зазора между частицами.

Перемещения центров масс и углы поворота частиц описываются уравнениями движения

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{x}_i}{dt^2} = \sum_{j \in \Gamma_i} \mathbf{F}_{ij} + m_i \mathbf{g}, \quad I_i \frac{d^2 \boldsymbol{\theta}_i}{dt^2} = \sum_{j \in \Gamma_i} \mathbf{r}_{ij} \times \mathbf{F}_{ij},$$

где m_i — масса i -й частицы; \mathbf{x}_i — радиус-вектор центра масс i -й частицы в декартовой системе координат Ox_1x_2 ; Γ_i — множество номеров контактов i -й частицы с j -ми частицами; \mathbf{F}_{ij} — сила на поверхности контакта i -й и j -й частиц; \mathbf{g} — ускорение свободного падения, направление которого противоположно направлению оси Ox_2 ; I_i — момент инерции; $\boldsymbol{\theta}_i$ — угол поворота; \mathbf{r}_{ij} — вектор, проведенный от центра масс i -й частицы до точки ее контакта с j -й частицей.

Считается, что столкновение частиц при движении не влияет на их форму, а возникающая при этом деформация $\varepsilon_{ij} = 2\delta_{ij}/r_{ij}$ определяется сжатием по нормали (величиной перекрытия частиц) δ_{ij} , равным

$$\delta_{ij} = d_{ij} - r_i - r_j$$

($d_{ij} = |\mathbf{d}_{ij}| = |\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|$ — расстояние между центрами частиц Ω_i и Ω_j). Таким образом, при сжатии частиц по нормали $\delta_{ij} < 0$. При $\delta_{ij} > 0$ между ними возникает сцепление. В этом

случае δ_{ij} — нормальное растяжение. Для i -й частицы введем нормаль \mathbf{n}_{ij} к поверхности контакта с j -й частицей, представляющую собой единичный вектор, направленный от центра масс Ω_i к центру масс Ω_j :

$$\mathbf{n}_{ij} = \mathbf{d}_{ij}/|\mathbf{d}_{ij}|.$$

Выражение для силы \mathbf{F}_{ij} представляется в виде

$$\mathbf{F}_{ij} = (F_{nij}^e + F_{nij}^d)\mathbf{n}_{ij} + F_{sij}\mathbf{s}_{ij},$$

где F_{nij}^e, F_{nij}^d — проекции упругой и диссипативной составляющих силы \mathbf{F}_{ij} на \mathbf{n}_{ij} ; F_{sij} — проекция силы \mathbf{F}_{ij} на единичный вектор \mathbf{s}_{ij} , лежащий в плоскости контакта. Упругая составляющая нормальной компоненты силы полагается линейно зависящей от δ_{ij} :

$$F_{nij}^e = \begin{cases} E_{ij}\delta_{ij}, & \delta_{ij} < 0, \\ E_{cij}\delta_{ij}, & 0 \leq \delta_{ij} \leq \delta_{ij}^*, \\ 0, & \delta_{ij} > \delta_{ij}^*. \end{cases}$$

Здесь $E_{ij} = 2E_iE_j/(E_i + E_j)$; $E_{cij} = 2E_{ci}E_{cj}/(E_{ci} + E_{cj})$; $E_{ci} = C_i/\varepsilon_i^*$; $E_{cj} = C_j/\varepsilon_j^*$; $\delta_{ij}^* = 2r_{ij}/(\varepsilon_i^* + \varepsilon_j^*)$.

Диссипативная составляющая равна

$$F_{nij}^d = \begin{cases} -v_{nij}\gamma_{nij}, & \delta_{ij} < 0, \\ 0, & \delta_{ij} \geq 0, \end{cases}$$

где v_{nij} — проекция относительной скорости \mathbf{v}_{ij} частиц на нормаль \mathbf{n}_{ij} ; γ_{nij} — коэффициент вязкости [11]:

$$\gamma_{nij} = 2m_{ij} \ln e_{nij}/t_{ij},$$

$m_{ij} = m_i m_j / (m_i + m_j)$; $e_{nij} = \min(e_{ni}, e_{nj})$; e_{ni}, e_{nj} — коэффициенты восстановления частиц [11, 12]; t_{ij} — длительность соударения частиц [13]:

$$t_{ij} = \sqrt{(\pi^2 + \ln^2 e_{nij})m_{ij}/k_{nij}}.$$

В соответствии с законом Кулона проекция F_{ij} силы \mathbf{F}_{ij} на \mathbf{s}_{ij} , представляющая собой величину силы трения, полагается равной

$$F_{sij} = -\operatorname{tg}[\min(\varphi_i, \varphi_j)]|F_{nij}^e|v_{sij}/|\mathbf{v}_{sij}|, \quad \delta_{ij} < 0,$$

где v_{sij} — проекция относительной скорости частиц \mathbf{v}_{ij} на вектор \mathbf{s}_{ij} .

3. Расчетные схема и параметры дозатора. Модельные сыпучие материалы. Лабораторные эксперименты проводились на плоском стенде, схема которого приведена на рис. 1. Соответствующие задачи об эволюции напряженно-деформированного состояния дозируемого сыпучего материала решались численно в двумерной постановке с использованием метода дискретных элементов.

Дозатор непрерывного действия состоит из заполненного сыпучим материалом бункера радиусом R (высота $H = 1000$ мм) и ложного днища, на котором размещен один из исследуемых дозирующих узлов. На рис. 1 представлена развертка сечения дозатора цилиндрической поверхностью радиусом $R_1 < R$, соосной с накопителем. Высота развертки $H_1 > H$, радиус $R_1 < R$, длина $L = 2\pi R_1 = 4021$ мм ($R_1 = 640$ мм; L — расстояние, которое узел дозирования разрабатываемого устройства проходит за один оборот диска). Первый из рассматриваемых узлов (так называемый козырьковый узел) состоит из ножа 1 и диска 2 с радиальной разгрузочной щелью 3. Для визуализации деформационных

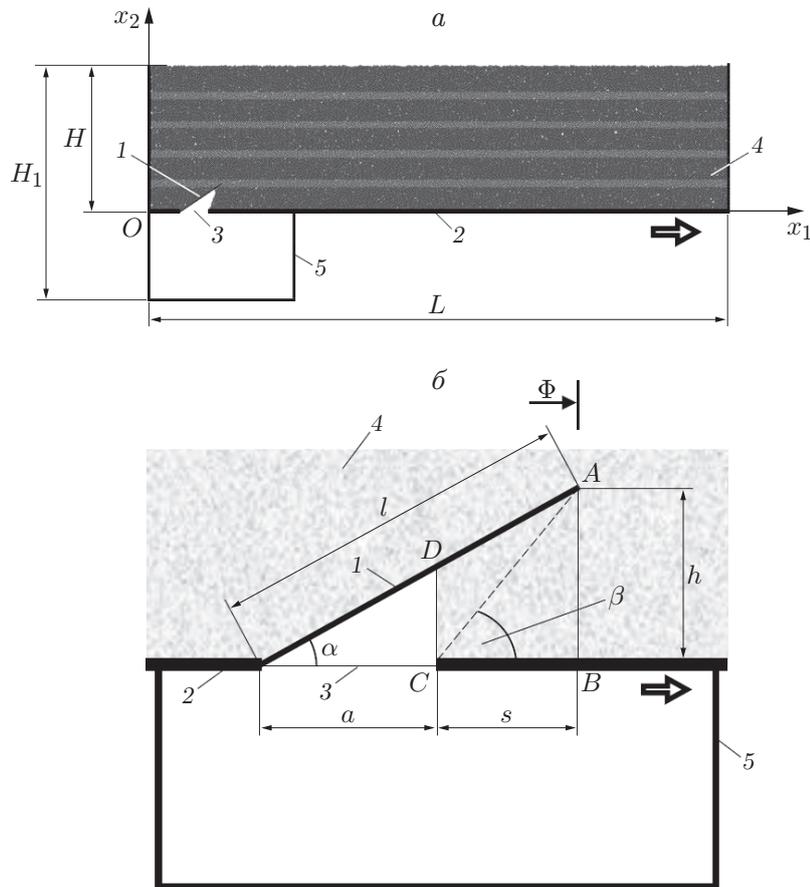


Рис. 1. Схема дозирования материала (а) и вертикальный разрез дозирующего узла (б):

1 — нож, 2 — диск, 3 — выпускное отверстие, 4 — сыпучий материал, 5 — материалоприемник; $ABCD$ — зона стесненного деформирования; стрелка — направление вращения диска; Φ — проходящая через рабочую кромку A козырька граница порции дозируемого сыпучего материала

картин, которые наблюдаются в бункере в процессе работы устройства, массив материала 4 формировался слоями, состоящими из частиц разного цвета. Дозированный материал через щель поступает в закрепленный на диске материалоприемник 5.

В лабораторных опытах схема, приведенная на рис. 1, воспроизводилась в масштабе 1 : 10. Физические эксперименты, как и численные, позволили отслеживать изменения, происходящие в материале в процессе дозирования. Стенд состоит из передней и задней стеклянных стенок, а также жестких боковых ограждений и подвижного днища с разгрузочным щелевым окном, оснащенным ножом заданной формы. При проведении экспериментов в качестве сыпучего материала использовались цемент и мука.

На рис. 1, б представлена схема рассматриваемого узла дозирования. Нож (козырек) 1 узла, имеющий длину l , закреплен на диске 2 под углом α , перекрывает выпускное окно 3 дозатора, имеющее ширину a , и на расстояние s выступает за противоположный край щели. Данная конструктивная особенность позволяет предотвратить самопроизвольное просыпание дозируемого материала 4 через отверстие 3 при перерывах в работе устройства. Рабочая кромка A ножа 1 находится на высоте h от диска, определяющей толщину отделяемого слоя материала. Величина s зависит от значений h и угла β обрушения пере-

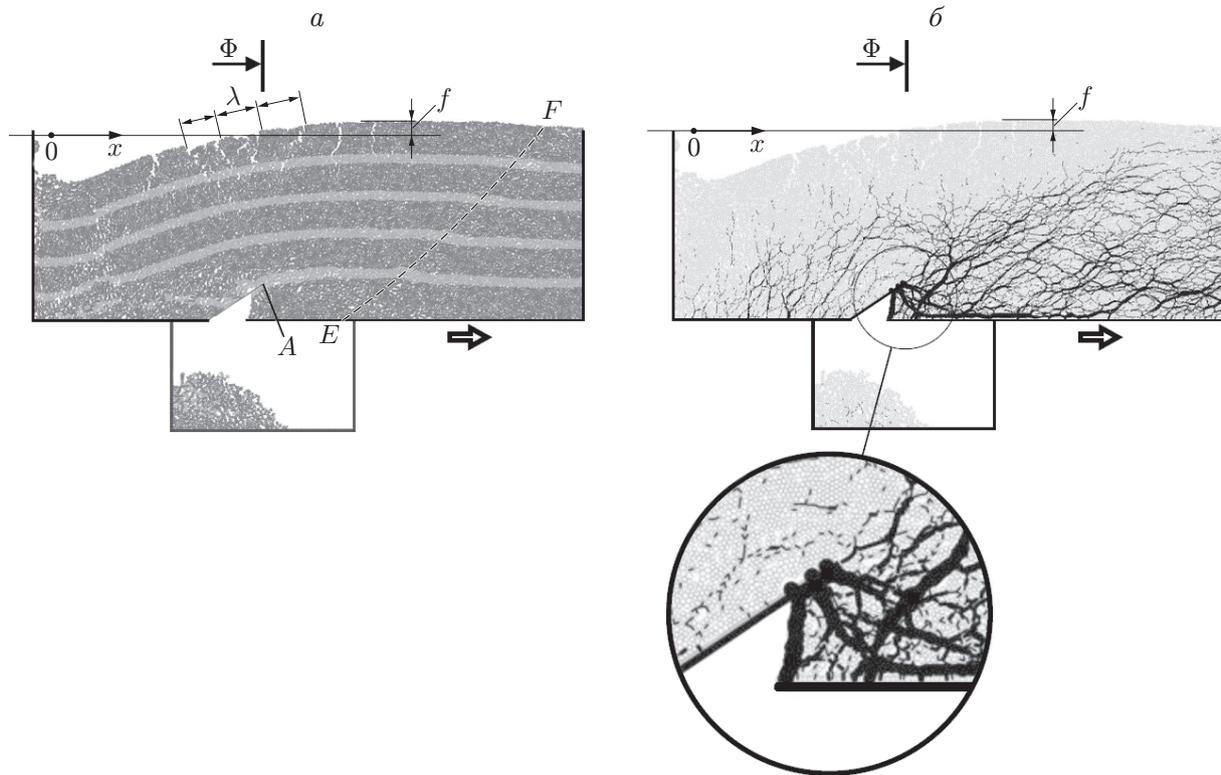


Рис. 2. Расчетные ДС сыпучего материала (а) и поле контактных сил в нем (б) в момент самозапирания материала в узле дозирования

рабатываемого сыпучего материала в разрыхленном состоянии. При заданных h, β длина ножа равна $l = h / \sin \alpha$, где $\alpha = \arctg(h / (a + s))$; $a \geq h$; $s \geq h \operatorname{ctg} \beta$. В расчетах использовались следующие значения параметров: $h = 200$ мм, $\beta = 50^\circ$, $a = h = 200$ мм, $s = h \operatorname{ctg} \beta = 160$ мм, $\alpha = 28^\circ$, $l = 420$ мм.

В численных экспериментах моделируемый материал полагался неоднородным по размерам частиц и состоящим из дискретных элементов (ДЭ), радиус r_i которых находится в диапазоне $4 \div 5$ мм. Физические характеристики частиц имели следующие значения: $\rho_i = 2800$ кг/м³, $E_i = 100$ ГПа, $\varphi_i = 17^\circ$, $C_i = 5$ кПа, $\varepsilon_i^* = 0,05$, $e_i = 0,3$. Приведенное значение коэффициента сцепления соответствует значению коэффициента сцепления для цемента и муки [14]. Лезвие ножа, диск и границы сыпучего материала в дозаторе, а также ограждающие поверхности материалоприемника 5 (см. рис. 1) моделируются в виде цепочек граничных дискретных элементов (ГДЭ) радиусом 5 мм. За счет частичного наложения элементов друг на друга расстояние между центрами соседних ГДЭ составляет 2,5 мм. Физико-механические характеристики ГДЭ те же, что и у других ДЭ. При использовании ГДЭ, в отличие от ДЭ, задаются краевые условия

$$\begin{aligned} v_{ax} &= v, & v_{ay} &= 0, & \omega_a &= 0, \\ v_{bx} &= 0, & v_{by} &= 0, & \omega_b &= 0, \end{aligned}$$

где v_{ax}, v_{ay}, ω_a — компоненты вектора линейной скорости \mathbf{v}_a и угловая скорость ГДЭ ножа, диска и приемника; $v = 0,1$ м/с; v_{bx}, v_{by}, ω_b — компоненты вектора линейной скорости \mathbf{v}_b и угловая скорость ГДЭ, принадлежащих границам бункера. Таким образом, козырек, диск, материалоприемник движутся в направлении, совпадающем с направлением оси Ox_1 , с линейной скоростью 0,1 м/с, границы бункера являются неподвижными.

4. Результаты исследования козырькового дозирующего узла. Работа рассматриваемого узла исследовалась при углах наклона ножа $\alpha = 15 \div 45^\circ$. На рис. 2,а для одной из стадий дозирования показано расчетное деформированное состояние (ДС) модельной среды, которое практически не отличается от экспериментального. На рис. 2,б представлено поле силовых линий [8], характеризующих напряженное состояние сыпучего материала в устройстве, на той же стадии дозирования. По толщине линий можно качественно оценить действующие в материале контактные силы: чем толще линии, тем значительнее силы. В процессе дозирования картины, подобные представленным на рис. 2, воспроизводятся многократно.

Результаты проведенных исследований показывают, что движение козырькового узла в заданном направлении сопровождается (см. рис. 2): 1) вспучиванием поверхности сыпучего материала перед границей Φ на величину f ; 2) разделением области поднятия поверхности почти вертикальными разрывами материала, образующимися с шагом λ ; 3) формированием позади границы Φ , продвигающейся вместе с узлом, существенно неоднородной разуплотненной сыпучей среды, имеющей блочную структуру. Параметры f , λ зависят от величины сцепления C дозируемого материала. При использовании реального дозатора это означает, что при каждом очередном обороте ложного днища в узел дозирования поступает материал, плотность ρ которого отличается от прежних значений. Таким образом, использование узла исследуемой конструкции приводит к изменению плотности перерабатываемого материала еще на стадии его подготовки к процессу дозирования. Сохранение плотности сыпучего материала $\rho = \text{const}$ в бункере дозатора является одним из условий, определяющих высокую точность работы рассматриваемых устройств с порошками, подверженными слеживанию и зависанию.

Результаты численных и лабораторных экспериментов показывают, что исследуемый процесс является нестационарным. При его реализации, несмотря на непрерывное вращение ложного днища и козырька, фазы дозирования чередуются с временным прекращением выпуска сыпучего материала устройством. Рис. 2 соответствует моменту, в который материалоприемник дозатора не пополняется частицами перерабатываемого материала. Из рис. 2,б следует, что данному моменту соответствуют сгущение и утолщение в области узла силовых линий, а также выстраивание этих линий в характерные цепочки перед границей Φ . Это означает, что узел, предназначенный для беспрепятственного выпуска порошка из дозатора, периодически становится источником роста сжимающих напряжений в очаге дозирования и области его влияния.

Данная особенность напряженного состояния сыпучего материала (см. рис. 2,а) является характерной для известного в механике грунтов “бульдозерного” эффекта [15]. Этот эффект реализуется при пассивном нагружении геосреды в результате разрушения и касательных смещений вдоль образующихся в геоматериале полос скольжения. Аналог EF подобных полос показан на рис. 2,а. Таким образом, использование при выполнении процедуры дозирования козырькового узла приводит к проявлению в перерабатываемом материале “бульдозерного” эффекта.

Результаты исследований, проведенных в работе [16], позволяют сделать вывод, что в данном случае “бульдозерный” эффект обусловлен наличием конструктивного дефекта, который представляет собой образованный расположенными под углом α друг к другу участком AD ножа и участком BC диска плоский асимметричный сходящийся канал (зона $ABCD$ на рис. 1,б). Поступающий в данный канал материал под действием возрастающих напряжений сжатия уплотняется. В результате в подкозырьковом пространстве узла происходит самозапирание сыпучего материала. Образовавшаяся пробка блокирует продолжающийся вращаться узел и превращается в “индентор”, который провоцирует реализацию в материале дозатора “бульдозерного” эффекта. После выдавливания пробки

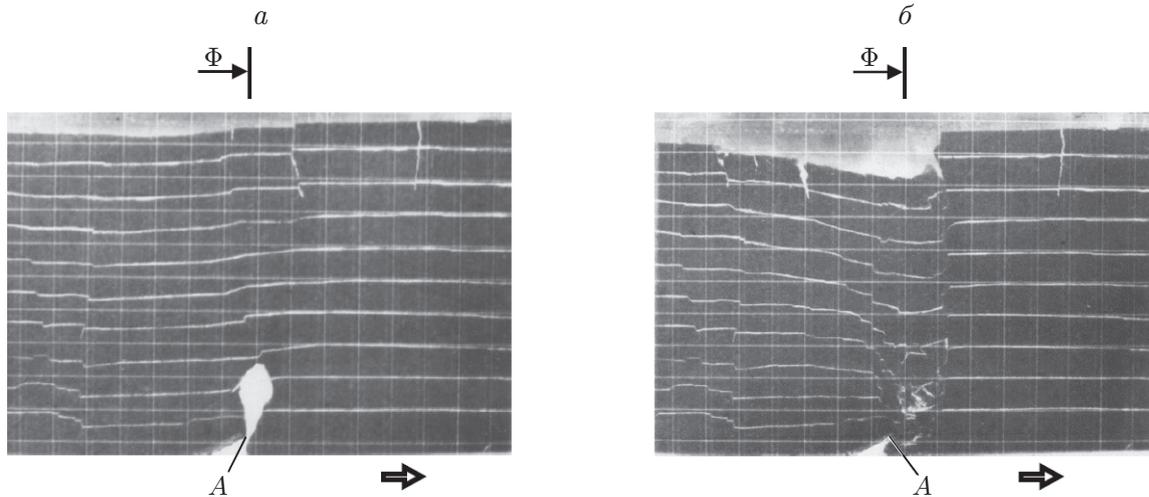


Рис. 3. ДС цемента в эксперименте после неконтролируемого перемещения материала с образованием в массиве материала над кромкой *A* полости (*a*) и локальной просадки (*б*)

из сходящегося канала процесс подачи порошка устройством возобновляется. Сила выталкивания тем значительнее, чем больше угол α наклона козырька узла. Многократные формирование и ликвидация в этом узле подобных заглушек приводят к тому, что процесс дозирования порошковых материалов становится прерывистым.

На рис. 3 приведены результаты лабораторного эксперимента, в котором выявлены особенности ДС дозируемого материала при его взаимодействии с концентратором напряжений — кромкой *A* ножа. Этот конструктивный недостаток рассматриваемого узла вызывает нерегулярные и неконтролируемые спорадические перемещения перерабатываемого материала из дозатора. Данный недостаток проявился при использовании в рассматриваемом эксперименте цемента, имеющего значительную для порошков плотность (приблизительно 1300 кг/м^3) и подобную жидкостям подвижность. На рис. 3 показано ДС цемента после неконтролируемого перемещения (в результате прорывов) материала под нож дозирующего устройства. Аналогичные прорывы не исключены также в случае переработки других порошков.

Результаты проведенного исследования позволяют сделать вывод, что источником концентрации напряжений, имеющей место при дозировании порошковых материалов аппаратами, оснащенными козырьковым узлом, является сужающаяся часть узла. Данный недостаток является неустранимым. Рассмотрим конструкцию узла, в котором сужающийся канал отсутствует.

5. Рамный узел и результаты его исследования. Рамный дозирующий узел представляет собой жесткую Г-образную раму [2], состоящую из консоли-отсекателя *1* в виде тонкой горизонтальной пластины и вертикальной стойки-стенки *2* (рис. 4). Стойка закреплена вдоль одной из длинных сторон разгрузочной щели *3* шириной *a* в диске *4* дозатора и может перемещаться по вертикали, что позволяет регулировать высоту *h* консоли-отсекателя узла над ложным днищем *4* (см. рис. 4, *б*). Длина консоли равна $l = a + s$ (*s* — величина, на которую отсекатель перекрывает передний край выпускного отверстия *3*). Принимается, что $s \geq h^* \text{ctg } \beta$ (h^* — максимально допустимая высота установки пластины над диском). В расчетах использовались следующие значения параметров: $\beta = 50^\circ$, $a = 200 \text{ мм}$, $s = 160 \text{ мм}$, $h = 200 \text{ мм}$, $l = 360 \text{ мм}$.

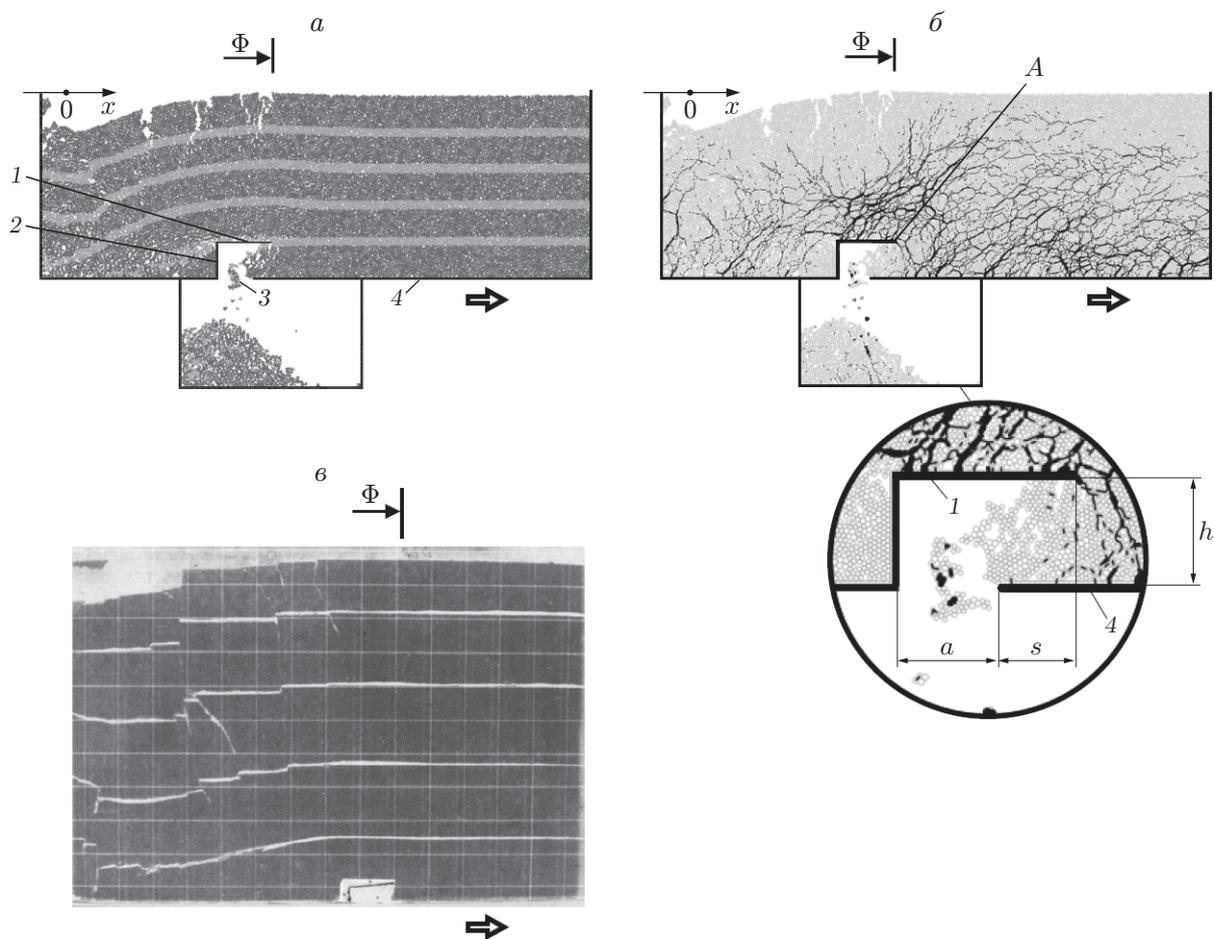


Рис. 4. Расчетные ДС сыпучего материала (*а*) и поле контактных сил в нем (*б*), а также ДС цемента в лабораторном эксперименте (*в*):

1 — консоль-отсекатель, 2 — стойка-стенка, 3 — разгрузочная щель, 4 — диск

Результаты численных и экспериментальных исследований показывают, что использование для дозирования порошковых материалов рамного узла, в котором отсутствует сужающийся канал, более предпочтительно, чем применение козырьковой конструкции. Использование нового, более совершенного узла предотвращает деформирование и нарушение сплошности свободной поверхности перерабатываемого устройством материала перед границей Φ (см. рис. 4, *а, в*); исключает концентрацию напряжений в области носика A отсекателя за счет удержания им сыпучего материала, который после выпуска слоя толщиной h остается в дозаторе (см. рис. 4, *б, в*); позволяет в течение всего процесса дозирования поддерживать в квазиоднородном состоянии силовое поле в сыпучем материале очаговой области и перед границей Φ (см. рис. 4, *б*); обеспечивает бесперебойное и достаточно равномерное истечение порошка из устройства.

Из рис. 4 следует, что применение нового узла не позволило решить проблему дробления перерабатываемого материала на блоки и как следствие непостоянства плотности сыпучего материала при дозировании. Причиной этого является наличие в Г-образной рамной конструкции тыльной ступени. Тем не менее серийные, оснащенные рассматриваемым узлом устройства (рис. 5) [2] дозируют материал с погрешностью порядка $1,5 \div 2,0$ %, что в определенной степени обусловлено повышенной чистотой механической обработки тонкого консольного отсекателя и диска дозирующих устройств.

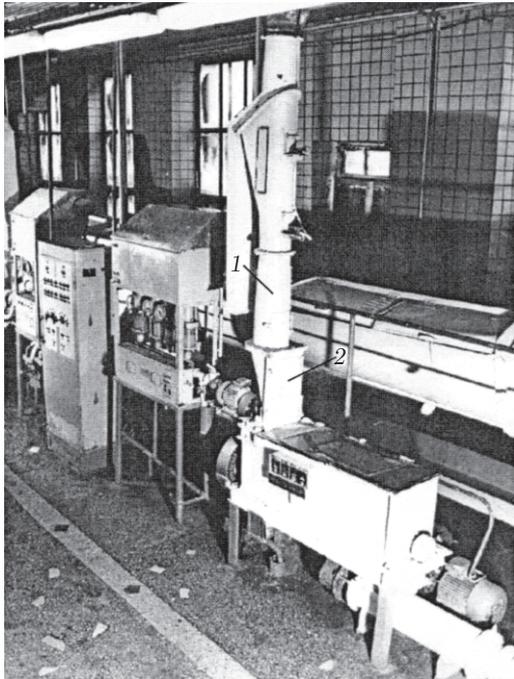


Рис. 5

Рис. 5. Дозатор в технологической линии, разработанный в Институте горного дела СО РАН:

1 — накопитель, 2 — выпускная воронка

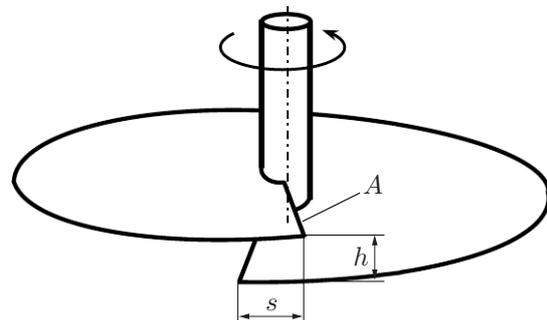


Рис. 6

Рис. 6. Схема лопастного узла дозирования

6. Конструкция высокоточного узла дозирования. Из результатов проведенных исследований следует, что в процессе дозирования узел должен оказывать минимальное воздействие на напряженно-деформированное состояние сыпучего материала, находящегося вне очаговой области. Для того чтобы данное требование было выполнено, в узле должны отсутствовать сужающийся канал и другие элементы, инициирующие неконтролируемое дробление порошка в накопителе дозатора, при этом отсекагель в узле должен иметь наименьшую допускаемую критерием прочности толщину и максимально гладкие рабочие поверхности.

На рис. 6 приведена схема лопастного узла дозирования, удовлетворяющего указанным выше требованиям. Предлагаемая конструкция является ложным днищем дозатора с дозирующим щелевым каналом. Днище представляет собой винтовую (с шагом h) лопасть, рабочая кромка A которой, как и у козырькового и рамного узлов, на расстояние s выступает над пассивным участком той же лопасти. Канал имеет длину s и высоту $h = \text{const}$. Вращение днища против часовой стрелки сопровождается отделением от сыпучего материала в устройстве ленты толщиной h , плавным (под действием силы тяжести) оседанием в нем порошка и постепенным беспрепятственным захватыванием вращающимся гладким каналом дозирования новых порций сыпучего материала. При таком шадающем режиме деформирования материала процесс дозирования осуществляется с погрешностью менее 1%. Производительность рассматриваемого лопастного узла определяется диаметром лопасти, шагом и скоростью ее вращения. Параметр s узла зависит от физико-механических характеристик перерабатываемого материала, что необходимо учитывать при дозировании любого подверженного слеживанию и зависаниям порошка.

Заключение. Таким образом, узел высокоточного непрерывного объемного дозирования трудносыпучих материалов представляет собой тонкую винтовую вращающуюся лопасть с высокой чистотой обработки поверхностей, закрепленную на вертикальном валу и содержащую окно в виде щелевого канала. Высокоточный объемный дозатор указанных материалов состоит из бункера рациональной формы, ложного дозирующего днища и конической воронки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Vetter G.** Systematology and accuracy of dosing methods for process components // The dosing handbook. N. Y.: Elsevier Adv. Technol., 1998. P. 3–44.
2. **А. с. 1557033 СССР, МПК В 65 G 65/48 (2000.01).** Дозатор сыпучих материалов / С. Б. Стажевский, Е. И. Шемякин, А. А. Крамаджян, Н. Ф. Стативко, Г. Н. Дьяков, Г. К. Лев, В. К. Шанин. Опубл. 15.04.1990, Бюл. № 14.
3. **Русин Е. П., Хан Г. Н.** К обоснованию конструкции бункера-накопителя для высокоточного объемного дозатора // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2020. Т. 2. С. 173–179.
4. **Kolatac R.** Gravimetric and volumetric feeding of particulate solids. Particulate solids, bin hopper and metering — basic fundamentals // Proc. of 1976 Nat. waste processing conf., Boston (USA), May 23–26, 1976. N. Y.: ASME, 1976. P. 361–372.
5. **А. с. 401616 СССР, МПК В 65 g 65/48, G 01 f 13/00.** Тарельчатый питатель / Б. М. Румянцев, Е. С. Фирскин. Опубл. 12.10.1973, Бюл. № 41.
6. **Cundall P. A., Strack O. D. L.** A discrete numerical model for granular assemblies // Geotechnique. 1979. V. 29, N 1. P. 47–65.
7. **Ковалев О. Б., Ковалева И. О.** Моделирование случайной упаковки насыпного слоя полидисперсных сферических частиц // ПМТФ. 2014. Т. 55, № 4. С. 184–192.
8. **Хоу С. К., Ван В., Ван З. Я. и др.** Силовые цепочки и течение гранулированной среды в третьем теле при сдвиговой дилатансии // ПМТФ. 2018. Т. 59, № 1. С. 178–188.
9. **Xu W. J., Liu G. Y., Yang H.** Study on the mechanical behavior of sands using 3D discrete element method with realistic particle models // Acta Geotech. 2020. V. 15. P. 2813–2828.
10. **Богульская Н. А., Богульский И. О.** Компьютерное моделирование движения неоднородной гранулированной среды // ПМТФ. 2020. Т. 61, № 2. С. 117–124.
11. **Schafer J., Dippel S., Wolf D. E.** Force schemes in simulations of granular materials // J. Phys. 1996. V. 6, N 1. P. 5–20.
12. **Thornton C.** Coefficient of restitution for collinear collisions of elastic perfectly plastic spheres // Trans. ASME. J. Appl. Mech. 1997. V. 64, N 2. P. 383–386.
13. **Kruggel-Emden H., Simsek E., Rickelt S., et al.** Review and extension of normal force models for the discrete element method // Powder Technol. 2007. V. 171, N 3. P. 157–173.
14. **Зимон А. Д.** Адгезия пыли и порошков. М.: Химия, 1976.
15. **Терцаги К.** Теория механики грунтов. М.: Госстройиздат, 1961.
16. **Ревуженко А. Ф., Стажевский С. Б., Шемякин Е. И.** О несимметрии пластического течения в сходящемся симметричном канале // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1977. № 3. С. 3–9.

*Поступила в редакцию 26/V 2021 г.,
после доработки — 26/V 2021 г.
Принята к публикации 31/V 2021 г.*