

УДК 622.693:539.3

**О ПИКЕ НАГРУЗОК НА ПИТАТЕЛИ  
НАПОЛЬНЫХ СКЛАДОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

**А. А. Крамаджян, Е. П. Русин, С. Б. Стажевский, Г. Н. Хан**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: gmmlab@misd.nsc.ru,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

На физических моделях и численно методом дискретных элементов исследовано напряженно-деформированное состояние фрагментированных пород в момент начала их выпуска с помощью пластинчатого питателя из секции напольного склада. Показано, что традиционные для узла разгрузки складов конструктивные решения не в состоянии нейтрализовать дилатирование геоматериала, являющееся основным фактором, определяющим реализацию пика нагрузки на питатель в момент его включения в работу. На основе результатов исследований предложены технологический прием заполнения раздробленными породами напольных складов, а для узла разгрузки их секций — конструктивная схема. Использование этих технических решений способно блокировать влияние дилатансии на напряженное состояние перерабатываемого сыпучего материала и, как результат, снять актуальную для питателей проблему пиковой нагрузки.

*Раздробленная руда, дилатансия, дилатансионное упрочнение, “ловушки” дилатансии, пиковая нагрузка, напольный склад, узел разгрузки, пластинчатый питатель, сходящийся канал*

Напольные склады предприятий горной промышленности, оборудованные подштабельными галереями с установленным в них питателем для разгрузки и передачи фрагментированного твердого полезного ископаемого по технологической цепочке, по существу являются бункерами [1]. Одна из главных проблем, с которой приходится сталкиваться в ходе их эксплуатации — пиковая нагрузка, развивающаяся в момент запуска на полотно подбункерного питателя и препятствующая началу его смещений, а тем самым выгрузке из аккумулирующей емкости, в частности раздробленной руды. Максимальная пусковая нагрузка способна превышать действующую на конструкцию в статике больше чем на порядок [1]. Это может приводить к перебоям в подаче геоматериала и аварийным ситуациям вплоть до выхода из строя подбункерной транспортной системы [2].

Установлено, что основной причиной действия на нее таких экстремальных нагрузок является дилатансионное упрочнение раздробленной рудной массы в области контакта с начинающим функционировать питателем [1, 3, 4]. Оно тем существенней, чем больше угол  $\nu$  дилатансии фрагментированной геосреды. Зависит он от ряда факторов [5]: растет с увеличением крупности и угловатости формы отдельных частей продукта дробления, плотности их упаковки, действующих в нем напряжений и стесненности условий деформирования транспортируемого питателем слоя [1]. Размер и угловатость слагающих его частиц являются параметрами, которые за-

висят от физико-механических характеристик и особенностей строения массива горных пород, а также от способа и качества его взрывания при добыче полезного ископаемого. Компактность упаковки разрушенного геоматериала, действующие в нем напряжения и степень стеснения его деформирования в указанном узле главным образом определяются конструктивным решением последнего и способом заполнения емкости-накопителя сыпучим материалом [3, 4]. Фактором, от которого зависит нагрузка на элементы подбункерного узла, в том числе на привод питателя, наряду с перечисленными выше, является также шероховатость его полотна.

На рис. 1 приведены схемы, поясняющие конструкцию секции одного из известных вариантов напольного склада руды. Оборудована секция щелевым узлом разгрузки 2 с пластинчатым питателем 1. Механика сыпучих сред [6] и рис. 1 делают понятным, что даже при одинаковых материале и способе заполнения им такой секции и стандартного бункера (в частности, “струей с постоянной высотой”, как это показано вертикальной стрелкой на рис. 1) на питатель 1, элементы разгрузочного узла 2 и днище 3 секции со стороны сыпучего 4 будут действовать вертикальные напряжения, распределение и абсолютные значения которых существенно иные, чем характерные для тех же элементов обычного бункера. Это означает, что найденная для него оптимальная с точки зрения минимизации пусковой нагрузки конструкция подбункерного узла может отличаться от таковой для узла аналогичного назначения напольного рудного склада.

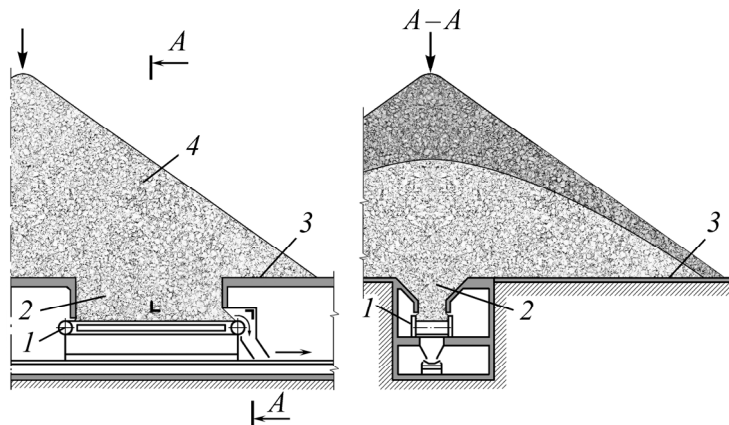


Рис. 1. Секция напольного склада фрагментированной руды

Статья посвящена изучению особенностей напряженно-деформированного состояния дробленого геоматериала в начальный момент его выпуска из секции складов через щелевой узел разгрузки с помощью пластинчатого питателя (см. рис. 1). Исследование выполнено с целью разработки рациональной схемы разгрузочного узла напольных складов предприятий горной промышленности, включая фабрики по обогащению руды, который способен обеспечить снижение пусковой нагрузки на питатель до минимальной и его безаварийную работу.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Базовая модель секции склада, на которой проведены исследования, представляет собой прямоугольную емкость высотой  $H = 160$  мм, с внутренним горизонтальным сечением  $L_x \times L_y = 190 \times 34$  мм (рис. 2а). Стенка 1 и участок 2 днища секции — металлические. Ее лицевое 3 и заднее 3' ограждения выполнены из стекла. Размеры  $L$  щелевого узла разгрузки 4 и  $L_p$  участка 2 пола стенда, имеющих ширину 34 мм, составляют соответственно 165 и 25 мм. Расстояние  $h_1$  от отметки поверхности пола до полотна 5 подштабельного питателя равно 40 мм. Полотно шириной 34 мм, как и в [1], изготовлено из наждачной бумаги. Ленту из нее укладывали, про-

пустив через зазор  $b$  между стенкой  $1$  и основанием емкости, на антифрикционную подложку в области разгрузочного узла  $4$  и подштабельной галереи  $7$ , которые разделены торцовым выпускным окном  $A$  модели. Его сечение  $h_2 \times L_y = 20 \times 34$  мм. В опытах по выбору для узла  $4$  оптимального решения использовали дополнительные конструктивные элементы.

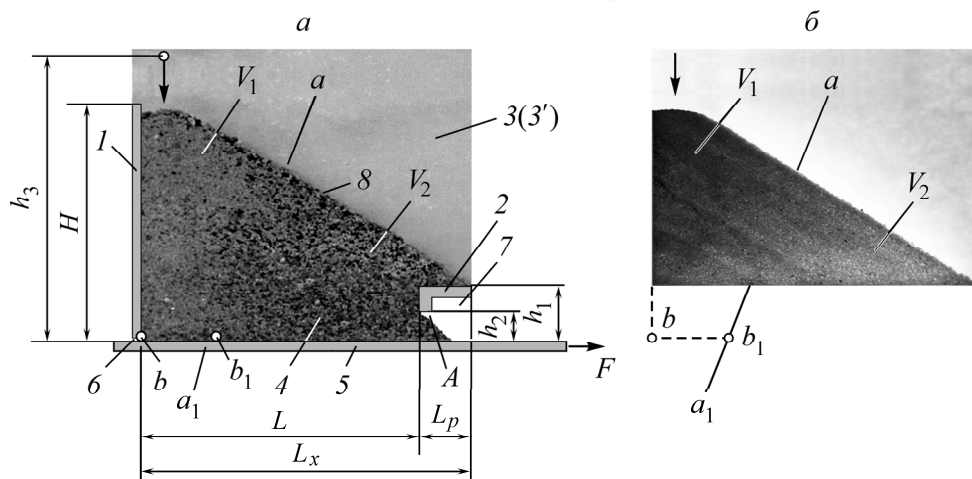


Рис. 2. Проявления в штабеле эффекта сегрегации ( $a$ ) и плотностной неоднородности ( $b$ ) сыпучих материалов

Складируемую рудную массу моделировали угловатой мраморной крошкой с размерами  $d$  частиц  $\sim 0.5-1.0$  мм и  $1.0-3.0$  мм или со средней крупностью  $d_m \approx 0.75$  и  $2.0$  мм соответственно. Коэффициент ее внутреннего трения  $k_1 = \text{tg}(\varphi_\mu + \nu)$ , где  $\varphi_\mu$  — угол контактного трения частиц, зависит от плотности их упаковки и имеет значения от  $0.4$  до  $0.8$ . Коэффициент  $k_2$  трения крошки о полотно питателя  $\sim 0.6-0.7$ . Загрузку секции модельным материалом осуществляли преимущественно, как показано на рис. 1, 2 вертикальной стрелкой, струей с постоянной высотой  $h_3 = 250$  мм, в ряде опытов — с “нулевой” высоты, т. е. при  $h_4 = 0$ . Это означает, что технологическую емкость с сыпучим перемещали вверх по мере роста штабеля  $8$ , постоянно поддерживая ее выпускное отверстие на уровне вершины насыпи. Средняя плотность уложенной в нее крошки составила  $1.34-1.38$  г/см<sup>3</sup>, угол  $\alpha$  ее естественного откоса находился в пределах  $33-40^\circ$ .

На рис. 2 приведены фотографии двух опытов, иллюстрирующие основные особенности насыпных объемов, формируемых струей. Первый эксперимент выполнен с песком, представленным фракциями  $\sim 0.5-3.0$  мм, в рассматриваемом стенде. Во втором случае использованы специальные стенд, сыпучий материал и методика его изучения в проходящем свете [7]. Области со слабым прониканием светового потока сквозь данный материал на фотографиях выглядят наиболее темными. Это означает, что сыпучая среда в них имеет минимальную пористость. Из рис. 2б следует, что такой пористостью обладает его расширяющаяся кверху область. Формируется она за счет растекания материала из зоны падения струи или потока. Та же зона на рис. 2а характеризуется концентрацией наиболее мелких частиц сыпучего. Самые крупные его отдельные частицы оказываются на периферии насыпи. Причина тому — сегрегация, которая реализуется при данном способе заполнения рудой напольных складов. Иллюстрации на рис. 2а, б позволяют представить штабель состоящим из характерных объемов  $V_1, V_2$ . Условная граница между ними обозначена прямой  $a-a_1$ . Составляющая  $V_1$  насыпи сложена частицами в среднем более мелкими, по сравнению со слагающими ее объем  $V_2$ , а средняя плотность их упаковки в ней выше, чем в области  $V_2$ .

Таким образом, фрагментированная руда штабеля только за счет способа его формирования имеет неоднородные по объему грансостав и плотность укладки. Вместе с тем в той же насыпи и на ее основание действуют снижающиеся от области падения струи к периферии вертикальные напряжения  $\sigma_z$ . Все это приводит к непостоянству угла  $\nu$  дилатансии вдоль подошвы запасенного штабелями геоматериала, а также отражается на распределении и абсолютных значениях нагрузок, включая пиковую, на подштабельные питатели напольных складов полезного ископаемого. В результате наиболее проблемным с точки зрения сопротивления со стороны материала насыпи началу смещений полотна питателя оказывается сложенный относительно мелкими частицами максимально уплотненный и нагруженный участок  $b - b_1$  ее основания (см. рис. 2). Ясно, что при других способах заполнения той же емкости-накопителя величина нагрузок, которые будут действовать на питатель узла разгрузки, и их эпюра, даже в случае одного и того же материала, должны различаться.

Опорожнение модельной секции, как и в опытах [1], проводилось за счет перемещения полотна 5 с помощью пружинного динамометра в направлении, которое на рис. 2 показано горизонтальной стрелкой. В ходе смещений  $l$  ленты с динамометра периодически снимались показания о прикладываемых к ней тяговых усилиях  $F$ . Значения  $l$  и  $F$  при обработке данных приводились к безразмерным величинам  $u = l/L$ ,  $p = F/P$ , где  $P$  — вес штабеля. Наблюдения через боковое прозрачное ограждение 3 стенда за изменениями в деформированном состоянии (ДС) сыпучего материала с началом его транспортирования подтвердили результат [1]. В соответствии с ним к моменту развития на питатель пиковой нагрузки смещения его полотна настолько малы, что видимых возмущений в деформированное состояние перемещаемой среды не вносят. Этим объясняется существование точки зрения [2], следуя которой пусковой пик  $F^*$  на приводе питателей связан с начальным статическим давлением фрагментированной породы на их полотно.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 3а представлено распределение контактных сил сжатия в сыпучем материале рассматриваемой модельной секции на момент развития приводом питателя максимального тягового усилия  $p^*$ . Видимые наклонные силовые цепочки в перемещаемом слое крошки можно интерпретировать как жесткие “распорки”, которые образуются с началом смещений между полотном и штабелем [1]. Самоорганизуются эти структуры в слое периодически и также периодически с появлением новых “распорок” исчезают. Наибольшие напряжения сжатия реализуются в тех из них, которые формируются в зоне  $b - b'$  насыпи, на что указывают их мощность и яркость (интенсивность окраски). Получена рассматриваемая картина в результате численного в плоской постановке моделирования процесса взаимодействия полотна питателя с транспортируемой дискретной массой. Выполнено оно с привлечением модификации [8] метода дискретных элементов (МДЭ) [9], одно из достоинств которого — учет дилатансии. В данном численном эксперименте наряду с физико-механическими характеристиками сыпучего материала и условиями на границах образующегося из него штабеля моделировали формирование последнего струей с высоты  $h_3 = 250$  мм. На рис. 3б показаны зависимости  $p = f(u)$ , полученные в опытах с насыпями, сложенными мраморной крошкой, у которой  $d_m \approx 2.0$  и  $0.75$  мм (кривые 1 и 3 соответственно), а также расчетом для штабеля из частиц с  $d_m \approx 2.0$  мм (кривая 2). Данные кривые сглажены. В действительности они имеют характерный для сред с дилатансией и трением скачкообразный характер. Непосредственными участниками проявления у кривых этой особенности являются жесткие “распорки”, в первую очередь те, что периодически самоорганизуются и разрушаются на участке  $b - b_1$  слоя, транспортируемого питателем (см. рис. 3а).

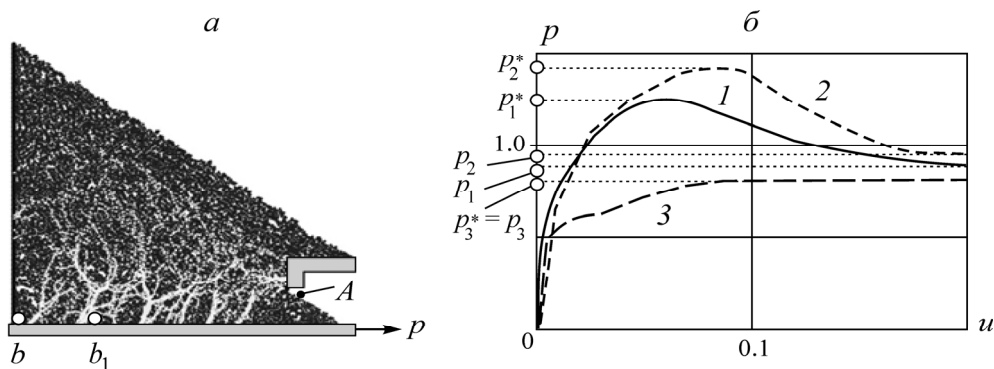


Рис. 3. Распределение в штабеле, сформированном струей с высоты  $h_3 = 250$  мм, и узле разгрузки пусковых контактных сил сжатия (а); кривые  $p = f(u)$ : 1, 3 — физический эксперимент с мраморной крошкой крупностью  $d_m \approx 2.0$  и  $0.75$  мм соответственно; 2 — расчет при  $d_m \approx 2.0$  мм (б)

Как показывают кривые на рис. 3б, пиковые  $p_1^*$ ,  $p_2^*$ ,  $p_3^*$  и установившиеся (или постпиковые)  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  нагрузки на привод подштабельного питателя при рассматриваемых способе заполнения складской секции сыпучим материалом и схеме ее разгрузочного узла зависят от среднего размера  $d_m$  отдельностей, слагающих насыпь. Более значительными данные нагрузки оказываются в случае крупной крошки (сравним кривые 1 и 3). Потому далее обсуждаются только эксперименты и расчеты, касающиеся крупнофракционного модельного материала.

На рис. 4а приведены результаты, полученные для секции напольного склада, которая имеет еще один из известных вариантов узла разгрузки. Отличается он тем, что оборудован предназначенным для снижения вертикальных нагрузок на питатель трехперегородочным стабилизатором давлений [1]. Его перегородки  $W$  высотой 20 и толщиной 5 мм отстоят друг от друга на 30 мм. Отметка их низа совпадает с уровнем верха выпускного окна  $A$  секции. Особенности взаимодействия стабилизатора с сыпучими материалами и механизм, определяющий флуктуации их давления на подбункерный питатель на примере плотно уложенной в аккумулирующую емкость мраморной крошки, подробно рассмотрены в [1].

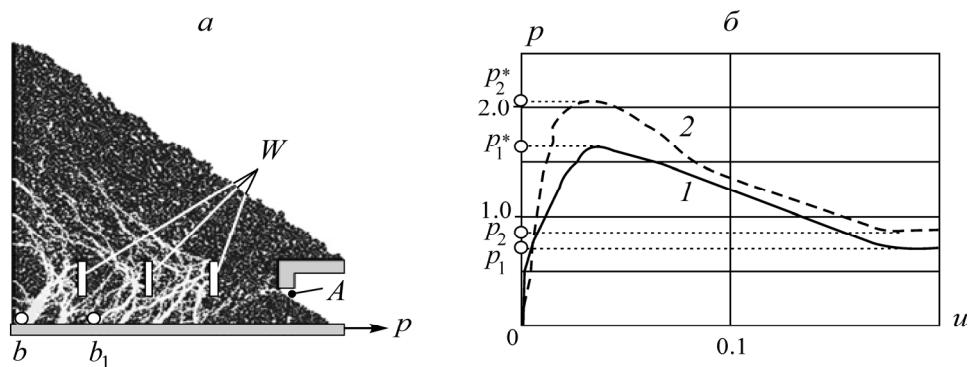


Рис. 4. Распределение пусковых контактных сил сжатия в штабеле, образованном струей при  $h_3 = 250$  мм, и узле со стабилизатором давлений (а) и зависимости  $p = f(u)$ : 1, 2 — физический и численный эксперименты с мраморной крошкой крупностью  $d_m \approx 2.0$  мм (б)

Численное моделирование показало, что, как и в [1], в данном случае перемычки  $W$  стабилизатора с началом перемещения материала в узле разгрузки превратились для образующихся в нем силовых цепочек в жесткие упоры (см. рис. 4а). Это становится ответом на вопрос о том, почему

оснащение узла перегородками не только не предотвратило развитие пикового давления на подштабельный питатель, а отсюда сопротивления  $p_1^*$  ( $p_2^*$ ) его полотна протягиванию, но, напротив, привело к существенному росту значения  $p_1^*$  ( $p_2^*$ ) (сравним экспериментальные 1 и расчетные 2 кривые рис. 3б и 4б). Отмеченные характерные особенности силовых цепочек позволяют заключить, что основное сопротивление перемещениям крошки в обсуждаемой ситуации оказано материалом участка  $b - b_1$  основания штабеля.

Таким образом, результаты физических и численных экспериментов показывают, что традиционные решения узла разгрузки секций напольных складов раздробленных полезных ископаемых не способны исключить развитие на подштабельный питатель высокой пусковой нагрузки. Объясняется это тем, что существующие конструкции узла не решают главную связанную с этим пиком проблему. Они не нейтрализуют основную причину ее возникновения — дилатансию. Более того, складывающиеся в известных разгрузочных узлах условия деформирования фрагментированной горной массы приводят к подавлению эффекта дилатансии, развивающегося в ней с началом перемещений, его трансформации в эффект дилатансионного упрочнения [1] и, как результат, к реализации в системе сыпучий материал — полотно питателя известного “анкерного” эффекта [10, 11].

#### К ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ ПОДШТАБЕЛЬНОГО УЗЛА РАЗГРУЗКИ

Задача оптимизации разгрузочного узла напольных складов сводится к снижению в нем уровня “стеснения” деформаций транспортируемого материала и действующих в нем сжимающих напряжений до минимума, а отсюда — к падению до минимума сопротивления развитию в геосреде эффекта дилатансии. Исследования показали, что для решения данной актуальной задачи практики могут быть рекомендованы: 1) оснащение указанного узла специальными “ловушками” или “компенсаторами”, нейтрализующими дилатансию; 2) исполнение его корпуса в виде канала, который сходится к полотну питателя; 3) меры по снижению угла  $\nu$  дилатансии в геоматериале проблемной области  $b - b_1$  основания штабеля (см. рис. 2).

На рис. 5 приведен результат численного эксперимента по выпуску крупной крошки из секции напольного склада с усовершенствованным узлом разгрузки. Данная конструкция оснащена одним из возможных вариантов “ловушек”  $D$ . Изготовлены они из половинок разрезанных вдоль металлических трубок, внешний и внутренний диаметры которых 20 и 17 мм соответственно. Число полученных таким образом арочных ловушек принято для узла из условия  $L_e \geq 10d_m$  [12], где  $L_e$  — межарочное расстояние. Выпускное отверстие с наименьшим просветом  $L_e$ , следуя [12], способно исключить зависания при истечении из емкости-накопителя материала с частицами крупностью  $\leq d_m$ . В данном случае  $L_e$ , отвечающее указанному условию, составляет 25 мм. Низ всех ловушек находится в створе с верхом торцового выпускного окна  $A$  узла разгрузки.

Численные эксперименты показали, что оснащение узла такими ловушками дилатансии привело к заметному сокращению непосредственно в слое, который транспортируется начавшим работать питателем, числа силовых цепочек (см. рис. 5а). Особенно важно, что они при этом практически исчезли в его зоне  $b - b_1$ . Большое количество цепочек и их яркость в теле штабеля над узлом разгрузки (сравним рис. 5а с рис. 3а) свидетельствуют о том, что арки  $D$ , несколько нейтрализовав дилатансию, приняли на себя еще и часть веса насыпи. То же подтверждается экспериментальной 1 и расчетной 2 кривыми рис. 5б.

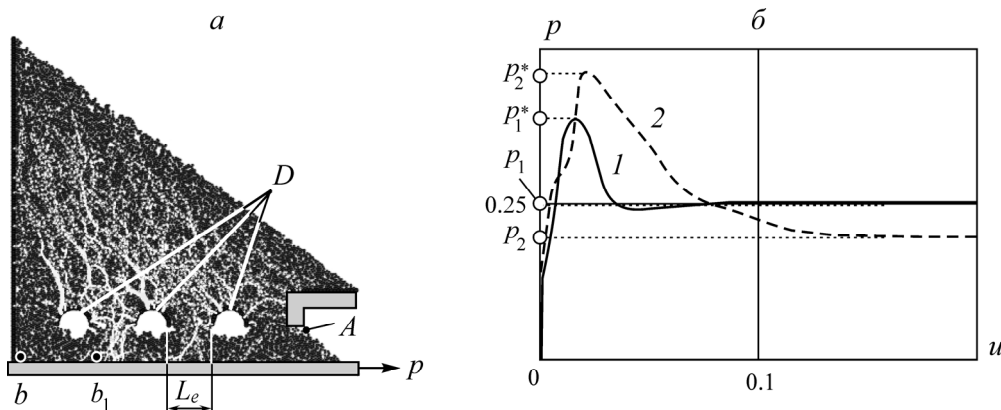


Рис. 5. Распределение в штабеле, сформированном струей при  $h_3 = 250$  мм, и узле разгрузки с трехловушечным компенсатором дилатансии пусковых контактных сил сжатия (а); кривые  $p = f(u)$ : 1, 2 — физический и численный эксперименты с мраморной крошкой крупностью  $d_m \approx 2.0$  мм (б)

Особенности взаимодействия сыпучего материала с трехарочным компенсатором дилатансии и полотном 1 подштабельного питателя позволяют понять рис. 6а, б. На первом из них приведен снимок области узла разгрузки с двумя ловушками D непосредственно после заполнения модельной секции крошкой. Стрелками обозначены напряжения  $\sigma_z$ , создаваемые весом штабеля в межловушечном пролете, а также реакция R на их действие со стороны стенок образованного арками сходящегося канала 2.

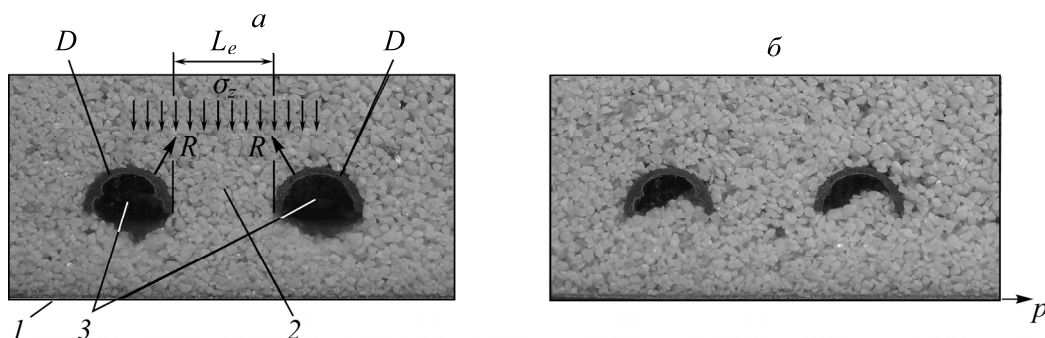


Рис. 6. Фрагмент узла разгрузки с арочными ловушками дилатансии: а — после заполнения секции крошкой; б — с началом ее перемещений

Заполнение секции сыпучим материалом сопровождалось формированием под арками полостей 3 (см. рис. 6а), которые с началом транспортирования слоя обеспечили материалу беспрепятственное дилатирование (см. рис. 6б). Сходящийся канал 2, как следует из [13], существенно снизил при этом давление на слой со стороны штабеля. Представление об эффективности сводчатых ловушек D в решении проблемы пускового пика  $p^*$  на приводе питателя дает рис. 7, где совмещены часть уже показанных экспериментальных кривых  $p = f(u)$ , а также полученные новые. Кривая 3 на рис. 7 демонстрирует, что введение в узел разгрузки аккумулирующей емкости трехарочного компенсатора дилатансии при прочих равных условиях привело к радикальному по сравнению с ситуациями на рис. 3, 4 (см. соответственно кривые 2, 1 на рис. 7) снижению на подштабельный питатель как пусковой  $p^*$ , так и установившейся  $p$  нагрузок. Максимальное для данного случая тяговое усилие  $p^*$  привода оказалось в  $\sim 4.7$  и  $3.6$  раза меньше соответственно пиковых  $p_1^*$ ,  $p_2^*$  и даже в  $\sim 2.9$  и  $2.3$  постпиковых значений  $p_1$ ,  $p_2$ , реализованных в опытах на рис. 3, 4, а ордината  $p$  кривой 3 в  $\sim 3.5$  раза меньше, чем величины  $p_1$ ,  $p_2$ .

Изложенное выше, результаты [13] и данные из рис. 6а легли в основу второй из перечисленных ранее рекомендаций по совершенствованию узла разгрузки емкостей-накопителей раздробленных полезных ископаемых. Выполнение его корпуса с вертикальным сечением в виде канала, передняя и задняя стенки которого начиная от питателя расходятся кверху, способны дополнительно снизить действующие на него максимальное и установившееся давления, а также сопротивление полотна протягиванию. Величина падения нагрузок зависит от угла раскрытия этого сходящегося книзу канала.

Экспериментальная кривая 4 на рис. 7 характеризует связь  $p = f(u)$ , полученную на основе серии опытов по транспортированию крупной крошки с использованием того же, что и выше, узла разгрузки. Отличались они от рассмотренных тем, что в них для проблемной области  $b - b_1$  штабеля принята мера по дополнительному снижению угла  $\nu$  дилатансии (см. п. 3 рекомендации). Такой мерой в данном случае стала подача сыпучего материала в модельную секцию “струей с нулевой высоты” или, что то же, “падающий” способ заполнения емкости. В области “падения” струи он обеспечил формирование рыхлой структуры ( $\nu = \nu_{\min}$ ). Этого, как следует из кривой 4 рис. 7, оказалось достаточно, чтобы исключить действие на подштабельный питатель пускового пика.

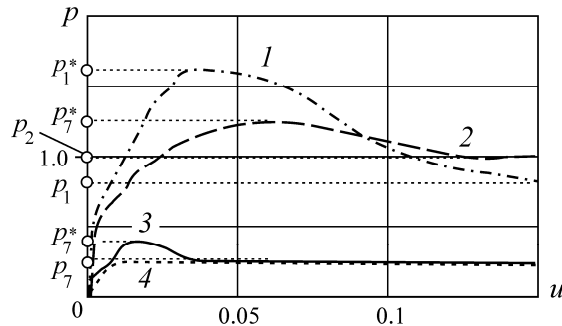


Рис. 7. Экспериментальные зависимости  $p = f(u)$  для крошки крупностью  $d_m \approx 2.0$  мм в случае узла: 1 — с трехперегородочным стабилизатором давлений; 2 — без стабилизатора; 3, 4 — с трехарочным компенсатором дилатансии; 1 – 3 — заполнение секции струей с высоты 250 мм; 4 — засыпка емкости “струей с нулевой высоты”

Таким образом, исследования подтверждают принципиальную возможность совершенствования узла разгрузки секций напольных складов раздробленных полезных ископаемых. Вместе с тем полученные результаты показывают, что, несмотря на достоинства, рассмотренное конструктивное решение узла оптимальным считать нельзя. Поясним причину этого с использованием рис. 6б. Демонстрирует он ДС крошки в области арок  $D$  для случая перемещений питателем фрагментированных пород на относительно небольшую величину  $u \approx 0.3$ . При их смещениях  $u \gg 0.3$  подсводовая полость 3 ловушек способна оказываться заполненной разрыхленной сыпучей средой и, как результат, прекращать нейтрализовывать дилатансию.

На рис. 8 приведены фотографии деформированного состояния штабеля из крупной крошки на начальной и развитой стадиях ее выпуска еще в одном из лабораторных экспериментов. Сформирована насыпь “струей с нулевой высоты”. От опыта на рис. 5 рассматриваемый отличается тем, что проделан с использованием в узле разгрузки модернизированного варианта компенсатора дилатансии. Состоит он из системы тех же арок-ловушек  $D$ , но представляет собой не просто трехарочную, а еще и ступенчатую в продольном вертикальном сечении узла конструкцию. Ее ступени-арки 1–3 имеют постоянный шаг  $L_e = 25$  мм. Задняя по ходу движения полотна питателя пята ловушки 1 установлена от него на расстоянии  $h_5 = 9$  мм, передняя — на  $\delta = 4$  мм выше. На данном новом уровне находится также задняя пята следующей арки 2. Далее подъем ловушек 2, 3 этого лестничного марша реализуется по той же схеме.



В результате передняя пята его ступени 3 поднимается до высоты  $h_6 = 21$  мм. Она на 1 мм больше, чем  $h_2$  у выпускного окна  $A$  узла разгрузки. Ось  $c - c_1$  симметрии арок 1–3 оказывается при этом отклоненной на некоторый угол от вертикали.

Как следует из рис. 8б, применение этого компенсатора дилатансии полностью исключило забутовку ловушек  $D$  узла разгрузки секции напольного склада транспортируемым материалом, а кроме того, обеспечило, в отличие от других рассмотренных случаев, его фактически равномерное истечение из нее. Связь  $p = f(u)$  при использовании модернизированной арочной системы характеризуется кривой, которая практически совпадает с кривой 4 рис. 7. Таким образом, последняя версия компенсатора, предотвращающая блокировку геоматериалом функционирования ловушек дилатансии, вместе с щадящим способом заполнения крошкой складской секции, который гарантирует формирование рыхлой структуры в проблемной области  $b - b_1$  штабеля, превратили узел разгрузки склада в “беспиковый” [1]. Факт наложения горизонтального участка кривой 4 на постпиковый отрезок кривой 3 позволяет заключить, что значение  $p = 0.25$  — тот абсолютный минимум, которого способно достичь сопротивление протягиванию полотна подштабельного питателя рассматриваемой модельной секции напольного склада.

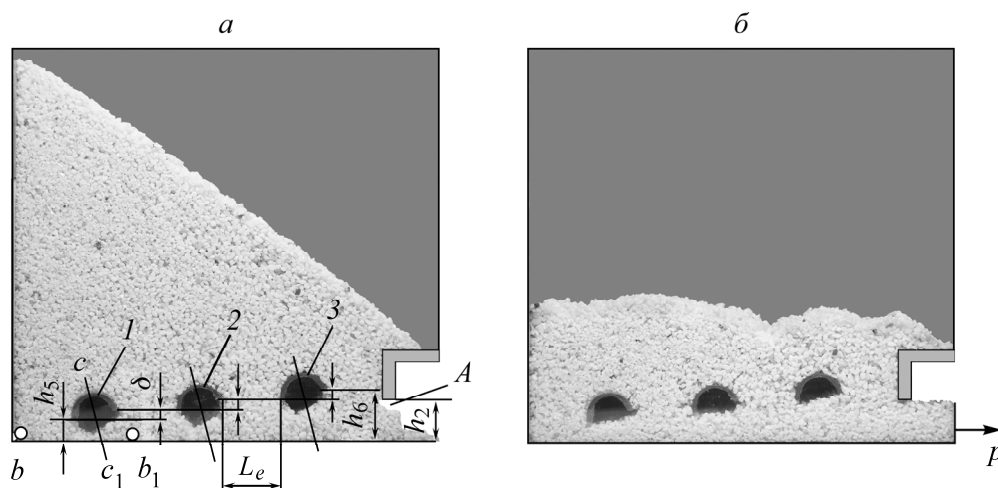


Рис. 8. Исходное (а) и конечное (б) деформированные состояния сыпучего материала в модельной секции с узлом разгрузки, оснащенным “разноуровневыми арочными ловушками”  $D$  дилатансии

Реализация в промышленных условиях в области  $b - b_1$  штабеля противодилатансионной меры в виде заполнения складских секций “струей с нулевой высотой” требует специальных технических средств. Выполненные исследования позволяют считать, что данной мере могут быть противопоставлены менее затратные, но не менее эффективные альтернативы.

## ВЫВОДЫ

Основной причиной развития пускового пика на приводе питателя является реализующееся с началом его работы дилатансионное упрочнение раздробленного твердого полезного ископаемого в области узла разгрузки аккумулирующей емкости.

Дилатансия и угол дилатансии перерабатываемого материала по длине узла не являются постоянными; зависят от ряда факторов и существенно — от способа заполнения секции склада сыпучим материалом.

Главное требование к создаваемому для емкостей-накопителей узлу разгрузки — гарантированно обеспечить, независимо от того, работает питатель или находится в статическом состоянии, минимальные плотность упаковки дискретной массы и ее давление на полотно — может

быть выполнено за счет: а) выбора рациональной технологии заполнения аккумулирующих емкостей сыпучим материалом и б) использования для их разгрузочного узла “согласованных” с ней “антидилатансионных” технических мер.

Следовательно, основным инструментом для выбора оптимальных решений подбункерного и подштабельного узлов разгрузки, а также рациональных формы, параметров и взаимного расположения их дилатансионных ловушек является численное моделирование. Проводиться оно должно для конкретных конструкций аккумулирующей емкости, сыпучего материала, способа его подачи в нее, а также разгрузочного узла, которым планируется ее оснастить.

Изложенное в полной мере касается проблемы оптимизации узлов разгрузки, оборудованных не только пластинчатыми, но и шнековыми, плунжерными и иными питателями, а также актуально для различного типа конвейеров, предназначенных для работы под завалами. Оптимизация разгрузочного узла емкостей-накопителей способна кардинально повлиять на снижение металло- и энергоемкости оборудования, используемого для перемещения фрагментированного полезного ископаемого [14].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крамаджян А. А., Русин Е. П., Стажевский С. Б., Хан Г. Н. О механизме формирования пиковой нагрузки на подбункерные питатели обогатительных фабрик // ФТПРПИ. — 2015. — № 6. — С. 19–27.
2. Roberts A. W., Ooms M., and Manjunath K. S. Feeder loads and power requirements in the controlled gravity flow of bulk solids from mass-flow bins, Transactions I.E. Aust., Australian Journal of Mechanical Engineering, 1984, Vol. 9, No. 1. — P. 49–61.
3. Крамаджян А. А., Миренков В. Е., Стажевский С. Б. О нагрузках на подбункерные питатели с тяговым рабочим органом // ФТПРПИ. — 1982. — № 6. — С. 21–30.
4. Исследование влияния конфигурации бункера, способов его загрузки и конструкции разгрузочных узлов на равномерность и полноту выпуска дробленой руды, имеющей различные физико-механические свойства. — Л.: МЕХАНОБР, 1983. — 186 с.
5. Бобряков А. П., Ревуженко А. Ф. Однородный сдвиг сыпучего материала. Дилатансия // ФТПРПИ. — 1982. — № 5. — С. 23–29.
6. Зенков Р. Л. Механика насыпных грузов. — М.: Машиностроение, 1964. — 251 с.
7. Крамаджян А. А., Русин Е. П. О методе исследования процессов деформирования и структуры сыпучего материала в проходящем свете // Интерэкспо “Гео-Сибирь-2010”. — Вып. 2. Т. 2. — Новосибирск: СГГА, 2010. — С. 164–169.
8. Хан Г. Н. О несимметричном режиме разрушения массива горных пород в окрестности полости // Физ. мезомеханика. — 2008. — Т. 11. — № 1. — С. 109–114.
9. Cundall P. A., Strack O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies, Géotechnique, 1979, Vol. 29. — P. 47–65.
10. Stazhevsky S. B., Kolymbas D., Herle I. Sand-anchors, theory and application, Anchors in theory and practice. Proceedings of the International Symposium on Anchors in Theory and Practice. Salzburg, Austria, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1995. — P. 367–371.
11. Стажевский С. Б. Механика становления и развития некоторых морфоструктур Земли. Ч. I. К происхождению и эволюции Патомского кратера // ФТПРПИ. — 2011. — № 4. — С. 23–39.
12. Дубынин Н. Г. Выпуск руды при подземной разработке. — М.: Недра, 1965. — 267 с.
13. Ревуженко А. Ф., Стажевский С. Б., Шемякин Е. И. Несимметрия пластического течения в сходящихся осесимметричных каналах // ДАН. — 1979. — Т. 246. — № 3. — С. 572–574.
14. Sharp J., Wittek A., Liddle G. Feeder loads investigation, CEED Seminar Proceedings, CEED Seminar, 29th September 2015, Crawley, WA, Australia. [http://www.ceed.uwa.edu.au/\\_\\_data/page/189986/Sharp.pdf](http://www.ceed.uwa.edu.au/__data/page/189986/Sharp.pdf) (21.06.2016).