

УДК 622.693:539.3

**О МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПИКОВОЙ НАГРУЗКИ
НА ПОДБУНКЕРНЫЕ ПИТАТЕЛИ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК**

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 раздробленной руды в узле разгрузки емкостей-накопителей обогатительных фабрик при ее принудительном выпуске с использованием пластинчатого питателя. Обосновано, что определяющей для развития действующей на него и элементы узла пусковой пиковой нагрузки является дилатансия. Показано, что абсолютное значение пика нагрузки зависит от физико-механических характеристик транспортируемой рудной массы, конструктивных особенностей разгрузочного узла и стесненности в нем условий ее деформирования. Продемонстрирована возможность усовершенствования одной из традиционных схем узла и обозначена перспектива создания для него новых решений.

Раздробленная руда, бункер, напольный склад, подбункерный узел, пластинчатый питатель, вертикальные перегородки, пиковая нагрузка, ширина зоны течения, дилатансия

Как известно, в качестве емкостей-накопителей раздробленного полезного ископаемого на предприятиях горной промышленности, включая фабрики по обогащению руды, используются бункеры и напольные склады [1–4]. Последние, в случае их выполнения по схеме с подштабельной галереей [4], по существу, не что иное как своеобразные бункеры. Те и другие для выгрузки перерабатываемого геопродукта оснащаются подбункерными узлом и питателем, в частности жестким пластинчатым [2, 3]. Эффективность работы перечисленного комплекса инженерных объектов определяется: правильным выбором технологии заполнения дробленным геоматериалом накопителя; его способностью обеспечить равномерное и без зависаний течение запасенного полезного ископаемого при разгрузке; надежной и безаварийной работой подбункерных узла и питателя в ходе принудительного торцового выпуска с их помощью геопродукта из аккумулирующей емкости. Влияние первых двух факторов на эффективность работы указанного комплекса в условиях флотационных фабрик достаточно полно освещено в работах [5, 6]. Рекомендации, разработанные на их основе, вошли в нормативный документ Министерства цветной металлургии СССР, который действует в стране с 1987 г. по настоящее время [7].

Данное исследование посвящено изучению механизма взаимодействия раздробленной руды с оснащенный жестким питателем подбункерным разгрузочным узлом. Оптимизация последнего без понимания особенностей этого механизма невозможна. Две основные проблемы, разрешение которых возлагается разработчиками на рассматриваемый узел, состоят в том, чтобы не допустить действия на установленный под ним жесткий подбункерный питатель пико-

вых (пусковых) нагрузок и обеспечить для зоны течения руды при ее выпуске из накопителя формирование максимально большого поперечного сечения. В [5, 6] рассмотрены подходы к решению этих задач. Вновь обратиться к ним позволили новые уровень понимания механизма деформирования сред со структурой, а также разработанные для проведения связанных с ними расчетов модель и модификация [8] метода дискретных элементов (МДЭ) [9]. В последние годы его широко используют для решения задач механики сыпучих сред [10].

Если следовать [11], одной из мер по совершенствованию аккумулирующих емкостей, применяемых на обогатительных фабриках, может считаться выполнение первых со все большей длины щелевым отверстием, а отсюда оснащение такого же типа протяженным разгрузочным узлом. Однако это ведет к увеличению участка полотна питателя, на который непосредственно действует возрастающее вертикальное давление P со стороны руды, запасенной в емкости-накопителе. Для его снижения в [5–7] предусмотрен ряд мер, а в [2] — оснащение щелевого подбункерного узла по простиранию поперечными устанавливаемыми с некоторым шагом вертикальными или наклонными (типа колосников) перегородками или специальными вставками [12]. Они разделяют щель на отдельные секции. Трение, развивающееся между стенками узла, поверхностями его перемычек и геоматериалом, поступающим из накопителя через эти секции на полотно питателя, предназначено снижать абсолютные значения нормальных напряжений, действующих на него с началом выгрузки полезного ископаемого из емкости. В действительности это далеко не так.

Решения второй задачи — повышения равномерности течения раздробленной рудной массы в подбункерном узле с расширением потока в накопителе при ее выпуске — рассмотрены в [2, 6]. В основном их использование сдерживается ограниченной шириной полотна существующих подбункерных питателей.

Таким образом, известные в России и за рубежом конструктивные схемы и технологические рекомендации, направленные на повышение эффективности работы разгрузочного узла бункеров и напольных складов обогатительных фабрик, считать оптимальными нельзя. Обсудим возможные шаги по совершенствованию конструкции этого проблемного узла для случая его оснащения пластинчатым питателем. В их основу положим результаты качественного и количественного физического и численного моделирования процессов, которые развиваются в подбункерном щелевом узле разгрузки руды с началом работы такого питателя.

СТЕНД И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Базовый стенд для экспериментального исследования процессов, реализующихся в деформируемом геоматериале подбункерного узла, представляет собой прямоугольную емкость высотой $H = 120$ мм, с внутренним горизонтальным сечением $L_x \times L_y = 120 \times 34$ мм (рис. 1а). Ее боковые стенки 1, 2 — металлические. Последняя на всю ширину L_y оснащена торцовым окном 3 высотой $h = 17$ мм. Лицевое и заднее ограждения 4, 4' экспериментального узла — стеклянные. Его питатель 5 моделировали “бесконечной” лентой с шириной $L_y = 34$ мм. Поскольку полотно пластинчатых питателей в силу конструктивных особенностей является шероховатым, ленту выполняли из наждачной бумаги. Данную ленту, пропустив через щель 6 элемента 1, укладывали на закрепленную в основании стенда антифрикционную подложку.

На модели подбункерного узла такой конструкции проведено относительно небольшое количество опытов. Основная их часть проделана на том же стенде, но оснащенном установленными с шагом $\delta = 30$ мм вертикальными высотой 20 мм и толщиной 5 мм перегородками 8,

низ которых находился на высоте 17 мм от полотна питателя, т. е. на уровне верха выпускного отверстия (рис. 1б'). При этом в ходе экспериментальных исследований имелась возможность менять высоту и шероховатость перемычек, их взаимное расположение. Будем систему перегородок с учетом их исходной предназначенности называть стабилизатором давлений или просто стабилизатором.

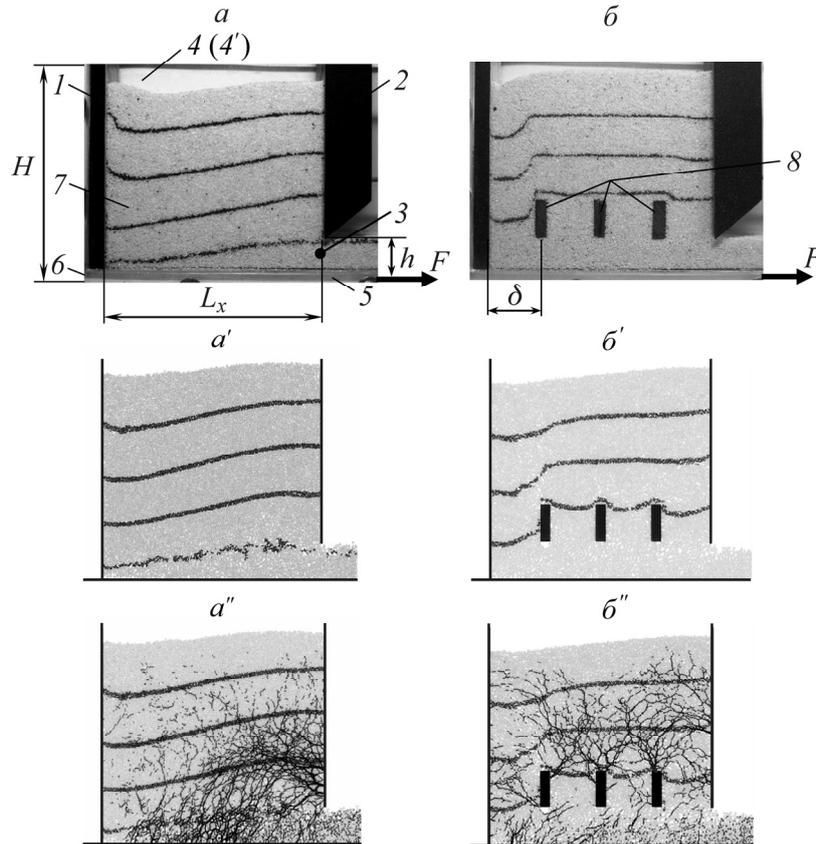


Рис. 1. НДС сыпучего материала при установившемся движении ($u = 70$) полотна питателя: $a, б$ — результаты лабораторных опытов на базовой и оснащенной стабилизатором моделях подбункерного узла соответственно; $a', б'$ — расчетное ДС мраморной крошки; $a'', б''$ — расчетное распределение контактных сил сжатия в ней

В качестве модельного сыпучего материала 7 использована угловатая мраморная крошка со средней крупностью d порядка 1 мм. Ее коэффициент внешнего трения о ленту составил $\sim 0.6-0.7$. Загружали сыпучий материал в стенд “дождем”. Это обеспечивало в узле формирование засыпки с достаточно плотной упаковкой (пористость ~ 0.42). Последующая его разгрузка проводилась за счет горизонтального перемещения полотна 5 питателя посредством пружинного динамометра в направлении торцового окна 3 (см. жирную стрелку на рис. 1а, б). С помощью динамометра в ходе смещений l ленты периодически регистрировалось прикладываемое к ней тяговое усилие F . Через прозрачное ограждение с использованием маркирующих прослоек фиксировалось изменение деформированного состояния (ДС) движущегося в стенде материала.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1а, наряду с деталями базового варианта модели подбункерного узла, показано деформированное состояние заключенного в нем сыпучего материала после смещения полотна питателя на безразмерную величину $u = l/d = 70$. Ниже (рис. 1а') представлены ДС модельно-

го материала, а также реализованная в нем картина распределения контактных сил (напряжений) сжатия (рис. 1а''), полученных при том же u численно. На рис. 1б — фото ДС крошки в узле, оборудованном трехпластинчатым стабилизатором давлений с перегородками высотой 20 мм. На рис. 1б', б'', как и в случае рис. 1а', а'', — расчетное деформированное состояние материала и картина распределения сжимающих напряжений в транспортируемой массе.

Измерения усилия F , прикладываемого к ленте модельного подбункерного узла, показали, что при видимых значительных отличиях соответствующих картин на рис. 1а–а'' и 1б–б'' существенно разными в рассматриваемых ситуациях были пиковые значения F_1^* , F_2^* , а также смещения u_1^* , u_2^* , при которых они реализовывались (рис. 2а, кривые 1, 2 соответственно). Однако самым главным оказалось то, что установка в стенд стабилизатора давлений не только не привела к ожидаемому снижению пускового сопротивления F_1^* ленты перемещениям (см. кривую 1 на рис. 2), а напротив, вызвала весьма значительный (почти трехкратный) его рост до величины F_2^* (сопоставим F_1^* , F_2^* кривых 1, 2 рис. 2). При этом F_2^* превысило усилие F_s протягивания полотна питателя, установившееся на участке постпиковых смещений более чем в 15 раз. Характер кривых $F = f(u)$, полученных для рассматриваемых схем узла численно, не отличается от такового у кривых 1, 2 рис. 2.

Результаты опытов показали, что рост F_2^* по отношению к сопротивлению F_1^* тем существенней, чем выше стенки стабилизатора (кривая 3 на рис. 2а), больше их количество n (рис. 2б) и шероховатость. Таким образом, модельные эксперименты и расчеты позволяют заключить, что практическое использование стабилизатора давлений, выполненного по обсуждаемой схеме (см. рис. 1б), не только не в состоянии повысить равномерность течения руды из оснащенных им аккумулирующих емкостей обогатительных фабрик или снизить пусковую нагрузку, действующую на конструктивные элементы подбункерного питателя и его привод, но, напротив, способно дополнительно и весьма значительно осложнить их работу.

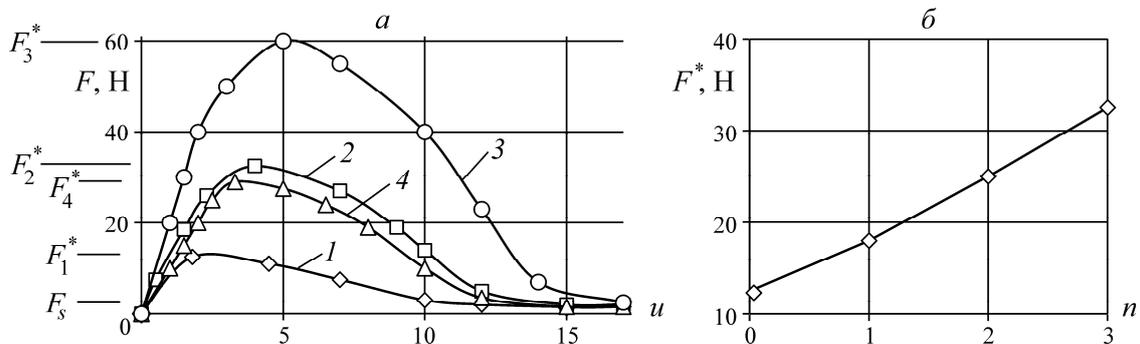


Рис. 2. Характер кривых: а — $F = f(u)$ для начального участка перемещения полотна питателя: 1 — базовый подбункерный узел; 2 — узел с трехперегородочным стабилизатором высотой 20 мм; 3 — узел с трехперегородочным стабилизатором высотой 80 мм; 4 — узел, оснащенный стабилизатором со смещенными перегородками высотой 20 мм; б — $F^* = f(n)$, где n — число перегородок стабилизатора

МЕХАНИЗМ РАЗВИТИЯ ПИКОВОЙ ПУСКОВОЙ НАГРУЗКИ НА ПИТАТЕЛЬ

Чтобы установить механизм реализации пусковых нагрузок F_1^* , F_2^* на питатель и выработать меры по их предотвращению (или хотя бы снижению), необходимо понять причину появления пиков. Обратимся к рис. 3, на котором представлены две пары картин. Получены они чис-

ленно и позволяют составить общее представление о напряженно-деформированном состоянии (НДС) геоматериала в рассматриваемых подбункерных узлах в точности на момент оказания их лентой пускового сопротивления F_1^* , F_2^* (см. рис. 2а). Наиболее характерно то, что пиковые значения F_1^* , F_2^* зарегистрированы при перемещениях ленты $u = u^*$, которые оказываются настолько незначительными, что в обоих случаях в расчетном ДС геоматериала отсутствуют даже признаки деформационных изменений (см. рис. 3а, б). Это подтверждается и физическими экспериментами. Вместе с тем, судя по картинам распределения в массиве сил сжатия (рис. 3а', б'), в транспортируемом слое (и над ним) при $u \leq u^*$ протекают весьма активные процессы. Из рис. 1а, б следует, что в конечном счете они приводят к его разрушению и разуплотнению.

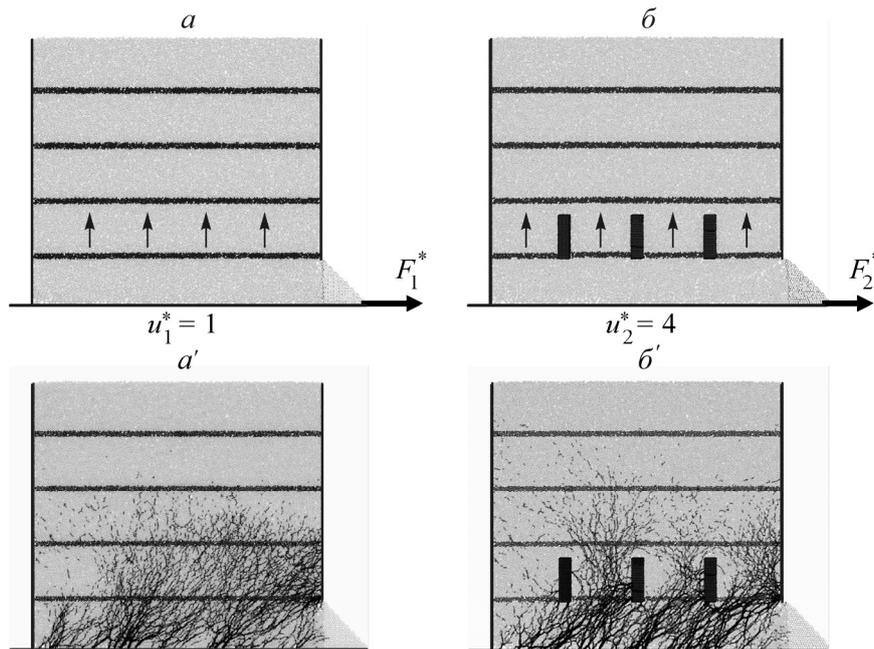


Рис. 3. Расчетное НДС сыпучего материала для момента реализации пиковой нагрузки в базовой модели стенда (а, а') и оснащенной стабилизатором давлений (б, б')

Лабораторные опыты (рис. 4а, б) демонстрируют изменения в слое мелкого песка, перешедшего в подбункерных узлах при F_1^* , F_2^* и $u = u^*$ к запредельному деформированию. Постпиковое ДС геоматериала в обоих случаях характеризуется функционированием образованных при $u = u^*$ полос скольжения (показаны на рис. 4а, б штрихами) и перекашиванием выделенных ими в геосреде блоков. Подобные картины проявляются при $u \geq u^*$ и в слое мраморной крошки. Плохо видимыми они (см. рис. 1а, б) оказываются исключительно из-за относительно большой крупности ее частиц. Таким образом, развитие пиковой нагрузки на пластинчатые питатели сопровождается разуплотнением транспортируемой ими рудной массы и локализацией в ней деформаций с образованием поверхностей скольжения и блочной структуры [13].

Деформированное состояние модельного материала на рис. 4а, б фактически не отличается от известного для грунтов и сыпучих сред, испытываемых в сдвиговых коробках [14, 15]. Вместе с тем форма кривых на рис. 2а в точности та же, что и у “стандартных”, которые получают с использованием указанных приборов для этих же геоматериалов при их достаточно плотной начальной упаковке. Кривые на рис. 2а подобно классическим имеют ветвь роста сопротивления слоя при нагружении, экстремум и ниспадающую ветвь, которая переходит в участок, от-

ражающий остаточную прочность грунтов и сыпучих сред при сдвиге. Абсолютное значение сдвиговой прочности для них связано с углом $\varphi = \varphi_{\mu} + \nu$, где φ_{μ} — угол контактного трения слагающих их частиц, ν — угол дилатансии этих геоматериалов [14]. Вклад ν в их прочностную характеристику — определяющий [16]. Величина угла ν тем больше, чем большими являются размеры частиц, слагающих массив, угловатость формы и начальная плотность их упаковки, уровень действующих на сыпучую среду напряжений и степень стесненности ее деформирования. Приложение к сыпучему материалу, находящемуся в условиях стеснения деформаций достаточно высоких внешних напряжений сжатия, способно приводить к подавлению дилатансии. Следствием этого становится трансформация эффекта дилатансии в эффект дилатансионного упрочнения деформируемой среды. В предельном случае касательные смещения в ней оказываются возможными лишь под действием сил, которые способны разрушить либо частицы, слагающие ее, либо элементы устройства, в котором она нагружается.

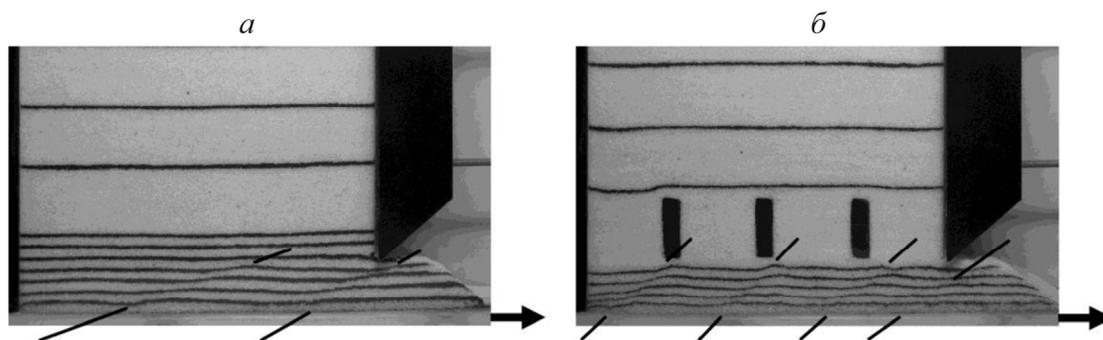


Рис. 4. Постпиковое ДС слоя мелкого песка в базовом стенде (а) и стенде со стабилизатором (б)

Изложенное и картины, которые демонстрируют особенности распределения сжимающих напряжений в материале-заполнителе подбункерных узлов при пуске их питателя (см. рис. 3а', б') и его работе в стационарном режиме (см. рис. 1а'', б''), делают понятной природу действующих на него пиковых нагрузок F_1^* , F_2^* (см. рис. 2). Связаны они с развитием при сдвиге в этом материале положительной дилатансии (см. вертикальные стрелки на рис. 3а, б). Впервые на это указано в [5, 6]. В случае базовой конструкции подбункерного узла (см. рис. 3а) повышенное пусковое сопротивление F_1^* , оказываемое полотном питателя началу собственных смещений, реализуется за счет частичного подавления в подготавливаемом к сдвигам слое дилатансии и такого же дилатансионного упрочнения. Происходит оно в основном под действием на данный слой вертикального, сравнительно небольшого [17, 18], давления со стороны сыпучего материала в аккумулирующей емкости.

Оснащение подбункерного узла стабилизатором (см. рис. 3б) радикально меняет ситуацию. Установка последнего приводит к гораздо более существенному, чем в базовом варианте узла, дилатансионному упрочнению слоя крошки с началом приложения к нему сдвиговой нагрузки. В этом случае в подавлении дилатансионного эффекта, наряду с вертикальным давлением, участвует еще и “отрицательное” трение сыпучего материала в подбункерной конструкции о перегородки стабилизатора. Возникает оно в момент пуска питателя из-за дилатансионного расширения и разуплотнения крошки, контактирующей с полотном (см. стрелки на рис. 3б), и приобретает знак, противоположный тому, что имело трение между ней и теми же перегородками после заполнения сыпучим системы “аккумулирующая емкость – узел разгрузки”. Повышение в нем за счет трения о перегородки стеснения деформаций приводит к развитию в геоматериала-

ле “сгустков” силовых цепочек [19] (см. рис. 3б), которые при $u = u^*$ “замещаются” полосами скольжения (см. рис. 4б). Весьма характерно, что их число и угол наклона к горизонту оказываются бóльшими, чем в случае базового подбункерного узла (сравни рис. 3а, б, 4а, б).

Особенности распределения в раздробленном материале подбункерного узла сжимающих напряжений (см. рис. 3б') можно интерпретировать как свидетельство формирования во время пуска питателя между его полотном и перегородками стабилизатора структур типа жестких “распорок”. Их устойчивость и величина F_2^* сопротивления началу движения полотна тем выше, чем значительней его и перегородок шероховатость, высота и толщина последних, а также размер и угловатость организующих “распорки” кусков сыпучего материала. Сочетание этих параметров может оказаться таким, что начало транспортировки рудной массы закончится аварийной ситуацией. В первую очередь при этом будут страдать конструктивные элементы привода подбункерного питателя. Разрушение указанных “распорок” с образованием и перекашиванием в слое полос скольжения и выделенных ими блоков приводит к утонению последнего с дальнейшим его разуплотнением, к новой смене знака трения вдоль перегородок стабилизатора на обратный и, как следствие, падению пускового сопротивления F_2^* полотна питателя до значения F_s (см. рис. 2).

О ПЕРСПЕКТИВАХ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ УЗЛА

Результаты [5, 6] и полученные выше открывают перспективы для разработки рациональных новых и модернизации существующих подбункерных узлов аккумулирующих емкостей руды обогатительных фабрик. На рис. 5 представлены результаты физического и численного моделирования еще одного варианта рассматриваемой конструкции. Они демонстрируют принципиальную возможность усовершенствовать даже самое неблагоприятное для работы питателя решение подбункерного узла (см. рис. 1б).

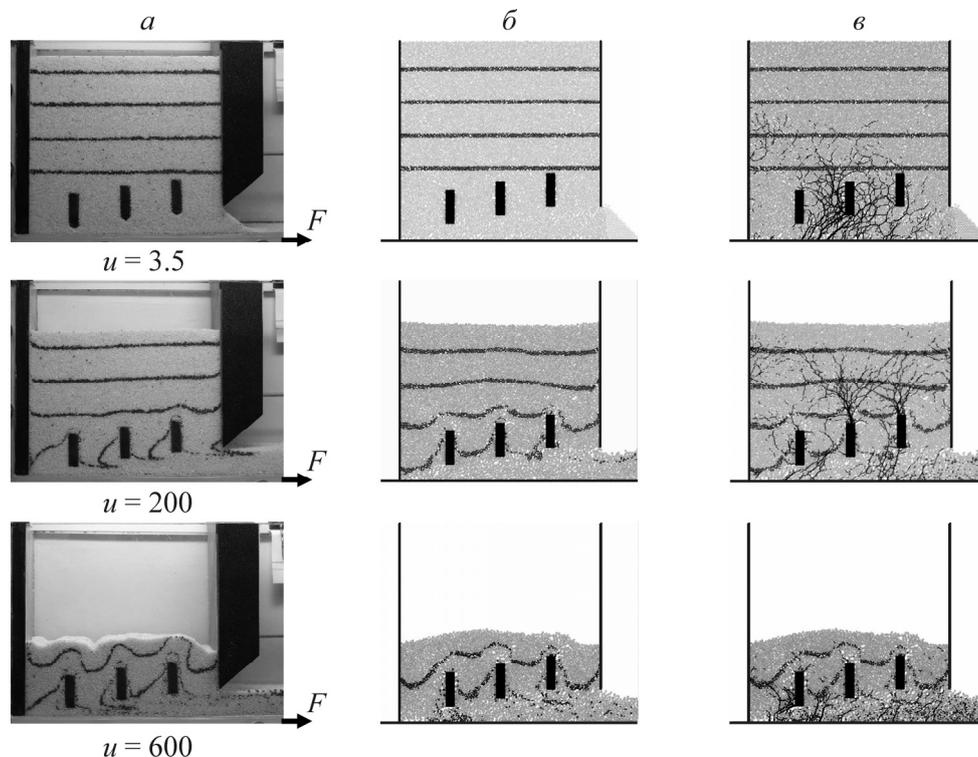


Рис. 5. Эволюция НДС мраморной крошки при торцовом выпуске из модернизированного подбункерного узла: а — физический эксперимент; б — расчетное ДС; в — расчетное распределение контактных сил сжатия

Видно, что даже простое выполнение перегородок стабилизатора на разном уровне (без выбора их рациональных высоты, толщины, формы, шага, превышения каждой последующей над предыдущей и др.) позволило снизить значение пусковой нагрузки F_4^* на питатель по сравнению с F_2^* на ~15 % (см. соответственно кривые 4, 2 на рис. 2, а также рис. 3б и 5в). Вместе с тем новое решение полностью отвечает второму основному требованию из предъявляемых к подбункерному узлу разработчиками. Его модернизированный вариант обеспечивает максимальные ширину потока и равномерность течения сыпучего материала в узле, а отсюда и в аккумулирующей емкости над ним.

ВЫВОДЫ

Главной причиной развития пиковой пусковой нагрузки на пластинчатый взаимодействующий с раздробленной рудой питатель подбункерного узла, а также элементы последнего является дилатансия — фундаментальное свойство сыпучих сред, которое играет решающую роль в их НДС при взаимодействии с конструкциями и машинами.

Участие дилатансии в формировании НДС геоматериалов означает возможность реализации пускового пика на питатели существующих конструкций подбункерного узла даже при относительно незначительной высоте слоя сыпучего в емкости-накопителе.

Абсолютное значение пиковой нагрузки зависит от физико-механических характеристик транспортируемой рудной массы, конструктивных особенностей взаимодействующих с ней элементов разгрузочного узла и условий ее деформирования.

Аккумулирующие емкости обогатительных фабрик эксплуатируются в условиях промышленной вибрации от тяжелых машин и оборудования, потому созданные без учета фактора дилатансии элементы узла разгрузки этих емкостей при вводе в эксплуатацию или повторных запусках подбункерного питателя после технологических остановок могут подвергаться пиковым нагрузкам вплоть до разрушающих, которые способны превышать рассчитанные на основе существующих представлений более чем на порядок.

Результаты исследований показывают, что сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния раздробленной руды, полученный для известных вариантов подбункерного узла с помощью “инструмента” в виде модифицированного МДЭ, позволяет выбрать среди них наиболее рациональный. Тот же “инструмент” и новые представления являются надежной основой для создания “безпиковой” конструкции подбункерного узла аккумулирующих емкостей предприятий горной промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разумов К. А., Перов В. А. Проектирование обогатительных фабрик. — М.: Недра, 1982.
2. Зенков Р. Л., Гриневич Г. П., Исаев В. С. Бункерные устройства. — М.: Машиностроение, 1977.
3. Wills B. A., Napier-Munn T. J. Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery, Burlington, Massachusetts, USA: Butterworth-Heinemann (Elsevier), 2006.
4. Dietiker F. D. Belt conveyor selection and stockpiling and reclaiming applications, Mular A. L. and Bhappu R. B., eds. Mineral Processing Plant Design, New York, NY, USA: SME, 1980.
5. Крамаджян А. А., Миренков В. Е., Стажевский С. Б. О нагрузках на подбункерные питатели с тяговым рабочим органом // ФТПРПИ. — 1982. — № 4.

6. **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.
7. **Нормы** технологического проектирования флотационных фабрик для руд цветных металлов (ВНТП 21-86) / Минцветмет СССР. — Дата введения 1987-01-01.
8. **Хан Г. Н.** О несимметричном режиме разрушения массива горных пород в окрестности полости // Физ. мезомеханика. — 2008. — Т. 11. — № 1.
9. **Cundall P. A., Strack O. D. L.** A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, 1979, Vol. 29.
10. **Клишин С. В., Микенина О. А., Ревуженко А. Ф.** Деформирование сыпучего материала вокруг жесткого цилиндрического включения // ФТПРПИ. — 2014. — № 2.
11. **Hartford C. E., Orlando A. D., and Carson J. W.** Feeder or conveyor: what's the difference and why does it matter? *Australian Bulk Handling Review*, March/April 2013.
12. **Roberts A. W.** Recent developments in feeder design and performance, Levy A., Kaiman H., eds. *Handbook of conveying and handling of particulate solids*, Vol. 10 (*Handbook of Powder Technology*), Amsterdam, New York, NY, USA: Elsevier, 2001.
13. **Ревуженко А. Ф., Стажевский С. Б., Шемякин Е. И.** О механизме деформирования сыпучего материала при больших сдвигах // ФТПРПИ. — 1977. — № 3.
14. **Роско К.** Значение деформаций в механике грунтов // *Механика: период. сб. иностр. статей.* — М.: Мир, 1971. — № 3.
15. **Бобряков А. П., Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И.** Однородный сдвиг сыпучего материала. Локализация деформаций // ФТПРПИ. — 1983. — № 5.
16. **Ревуженко А. Ф., Стажевский С. Б.** Об учете дилатансии в основных справочных формулах механики сыпучих сред // ФТПРПИ. — 1986. — № 4.
17. **Ревуженко А. Ф., Стажевский С. Б., Шемякин Е. И.** Новые методы расчета нагрузок на крепи // ФТПРПИ. — 1976. — № 3.
18. **Стажевский С. Б.** К выбору формы и креплению выработок // ФТПРПИ. — 1986. — № 5.
19. **Дрешер А., де Йоселен де Йонг Ж.** Проверка механической модели течения гранулированного материала методами фотоупругости // *Определяющие законы механики грунтов.* — М.: Мир, 1975.

Поступила в редакцию 13/Х 2015