Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLIV, вып. 1, 1961 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВОДООБРАЗОВАНИЯ В БУНКЕРАХ

И. Г. Иванов

Важнейшей эксплуатационной характеристикой бункера является равномерность истечения материала при открытом выпускном отверстии. При нарушении этого процесса возникают многочисленные затруднения, часто вызывающие необходимость работы в аварийном режиме или серьезное расстройство всего технологического комплекса предприятия (обогатительной фабрики, металлургического завода, электростанции).

Нарушение процесса истечения материала из бункера вызывается заклиниванием и сводообразованием. При заклинивании происходит застревание нескольких крупных кусков материала в зоне выпускного отверстия [3]. Оно надежно устраняется правильным выбором соотношения размеров выпускного отверстия и максимальных кусков материала. Установлено, что заклинивание практически полностью предотвращается, если размеры выпускного отверстия в 4—5 раз превосходят размеры наиболее крупных кусков материала.

При сводообразовании в зоне выпускных отверстий образуются куполообразные своды, иногда весьма прочные и трудноразрушаемые. Причинами сводообразования являются различные физико-механические свойства бункеризуемого материала, которые в процессе загрузки и хранения в бункере могут изменяться в широких пределах.

В зависимости от качественной характеристики причин, определяющих возникновение устойчивого свода в сыпучем материале, следует различать две разновидности процесса сводообразования:

1) сводообразование в крупнокусковом сортированном материале, когда свод образуется в результате случайной комбинации в расположении кусков материала и удерживается в равновесии за счет сил трения как между отдельными кусками, так и между пятой свода и стенками бункера; сводообразование при таких материалах мало зависит от влажности, срока хранения в бункере, окружающей температуры и некоторых других факторов;

2) сводообразование в мелкофракционном материале, когда свод образуется благодаря наличию связности материала, при которой указанные выше факторы приобретают решающее значение.

Сводообразование — основная причина нарушения нормальной работы большинства бункерных установок. Надежных способов его устранения не существует, а теоретически вопрос этот исследован недостаточно

В [illegible] обобщены

ствующих работ в этой области, а также производится попытка дальнейшего развития и совершенствования теории сводообразования в бункерах. Теоретические выводы подтверждены экспериментами, проведенными автором в лабораторных и промышленных условиях.

Многочисленные отечественные и зарубежные исследования сводообразования позволили дать объяснения многим процессам этого явления, а также установить некоторые теоретические и экспериментальные зависимости.

В теоретическом отношении наибольшего внимания заслуживают исследования В. А. Олевского для крупнокусковых сортированных мате-

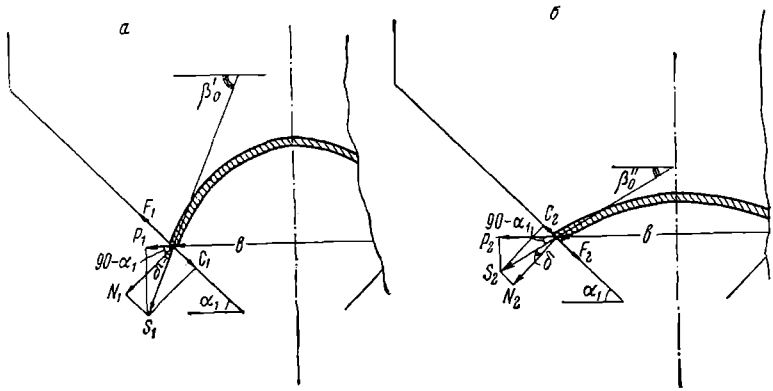


Рис. 1. Равновесие пяты:
а — при крутом своде; *б* — при пологом своде

риалов [3] и Р. Л. Зенкова для мелкофракционных материалов, обладающих связностью [6].

По мнению В. А. Олевского, решающее влияние на прочность и устойчивость свода для крупнокусковых сортированных материалов оказывают величина пролета свода и угол наклона стенок днища. Влияние пролета свода очевидно: чем больше пролет, тем из большего числа кусков при данной крупности материала образуется свод и, следовательно, тем меньше вероятность его образования. Как показывают исследования, основанные на применении методов статистического анализа, возникновение сводов полностью исключается при

$$A \geqslant (4-6)\, d_{\max}, \tag{1}$$

где A — ширина выпускного отверстия;

$d_{\max}$ — максимальный размер кусков.

Несколько сложнее выявляется зависимость процесса сводообразования от угла наклона стенок днища. Оси сводов, по заключению В. А. Олевского, приближаются к параболам. Для параболических сводов нетрудно определить горизонтальную составляющую давления (распор), которую свод передает на стенки бункера (рис. 1)

$$P = \frac{qb}{2\operatorname{tg}\varphi_0} \tag{2}$$

где P — нагрузка на единицу горизонтальной проекции свода, *кг/пог. м*;

b — горизонтальная проекция свода, *м*;

φ_0 — угол наклона касательной к оси свода в точке его соприкосновения со стенкой бункера, *град*.

Как видно из уравнения (2), на величину распора P влияет кривизна свода, характеризуемая углом β_0. Однако даже при постоянном угле наклона стенок днища своды могут различно располагаться внутри бункера и иметь различную кривизну, лежащую в некоторых пределах $\beta_{0_{max}} \geqslant \beta_0 \geqslant \beta_{0_{min}}$, при которых равновесие свода сохраняется. При крутых сводах, когда $\beta_0 > \beta_{0_{max}}$, пята свода, опирающаяся на стенку бункера, сползает по этой стенке вниз и равновесие свода нарушится. При пологих сводах, когда $\beta_0 < \beta_{0_{min}}$, пята может переместиться вверх.

Для определения $\beta_{0_{max}}$ и $\beta_{0_{min}}$ рассмотрим условие равновесия пяты свода, которое зависит от соотношения сил, стремящихся сдвинуть пяту (силы веса), и сил, удерживающих ее в равновесии (силы трения). Как видно из рис. 1, *а*, при крутых сводах пята удерживается от сползания вниз силой трения F_1, направленной вверх и превосходящей величину сдвигающей силы C_1. При этом величина угла

$$\beta_0' = 90 - \alpha_1 + \delta \tag{3}$$

где α_1 — угол наклона стенок бункера;

δ — угол между направлением давления пяты свода на стенку и нормально к стенке.

При пологих сводах (рис. 1, *б*) пята удерживается от перемещения вверх силой трения F_2, направленной вниз, а угол

$$\beta_0'' = 90 - \alpha_1 - \delta. \tag{4}$$

Когда сдвигающие силы равны удерживающим, формулы (3) и (4) имеют вид:

$$\beta_{0_{max}} = 90 - \alpha_1 + \rho; \tag{5}$$

$$\beta_{0_{min}} = 90 - \alpha_1 - \rho, \tag{6}$$

где ρ — угол трения материала о стенки бункера.

Соответственно величины распоров для крутых сводов

$$P_{min} = q \frac{b}{2} \operatorname{tg} (\alpha_1 - \rho); \tag{7}$$

для пологих сводов

$$P_{max} = q \frac{b}{2} \operatorname{tg} (\alpha_1 + \rho). \tag{8}$$

Таким образом, с увеличением угла наклона стенок днища α_1 увеличивается и значение распора. В. А. Олевский указывает, что при $\alpha_1 \geqslant 60°$ образующиеся пологие своды могут создавать настолько большие распоры и нормальные к наклонным стенкам давления, что возникающие при этом силы трения могут намного превосходить сдвигающие пяту силы, поэтому такие своды обладают высокой прочностью и трудно поддаются разрушению.

В изложенном анализе В. А. Олевский исходит из предположения, что на устойчивое положение свода влияет лишь равновесие пяты. На самом деле, свод состоит из отдельных кусков материала, связанных между собой силами трения и представляющих как бы отдельные звенья в цепи свода. Совершенно очевидно, что равновесие каждого такого звена также влияет на устойчивость свода. Кроме того, как показывают наблюдения, своды в крупнокусковых сортированных материалах не

всегда имеют параболическую ось, а могут принимать самые различные очертания, что зависит от формы и размера кусков, от случайной комбинации их расположения и т. д. Следует заметить, что все построения и вычисления производились В. А. Олевским применительно к плоской задаче, в действительности же сам свод представляет пространственный купол с условиями равновесия, отличными от условий равновесия плоской параболической арки.

Несмотря на указанные упрощения, выводы В. А. Олевского сохраняют практическое значение при расчетах оптимальных параметров бункеров для крупнокусковых сортированных материалов: размеры выпускного отверстия определяются по формуле (1), а углы наклона стенок днища должны быть по возможности меньшими [следствие из формул (7) и (8)]. Более детально этот вопрос разработан К. В. Алферовым [1], который для различных бункеров установил нижнюю границу наклона стенок днища из условия полного опорожнения бункера.

Например, для конического днища угол наклона образующей стенки днища

$$\alpha = \varphi_1 + 3^\circ, \tag{9}$$

где φ_1 — угол трения материала о днище.

Для пирамидального днища величина угла α определится наименьшим допустимым углом наклона ребер двугранного угла Θ, образуемого стенками днища

$$\theta = \varphi_1 + (5^\circ - 10^\circ). \tag{10}$$

Практикой эксплуатации бункеров установлено, что верхняя граница углов наклона стенок днища не должна превышать 50°, поскольку при бóльших значениях углов наклона образующиеся своды обладают высокой прочностью и трудно поддаются разрушению.

Таким образом, явление сводообразования в крупнокусковых сортированных материалах изучено достаточно хорошо, выводы теории подтверждаются экспериментальными данными и практикой эксплуатации. Выявление более точных количественных зависимостей вряд ли имеет практический смысл, так как некоторые явления процесса сводообразования носят случайный характер и трудно поддаются учету.

Иначе обстоит дело при бункеризации мелкофракционных связных материалов. Процесс сводообразования в подобных материалах изучен недостаточно, и о нем существуют различные мнения.

Из работ в этой области наибольшего внимания заслуживают теоретические и экспериментальные исследования, проведенные Р. Л. Зенковым [6], по мнению которого, надежная работа бункера может быть обеспечена лишь при правильном выборе размеров выпускного отверстия в зависимости от механических свойств бункеризуемого материала. Появление сводов в связных материалах объясняется тем, что материал в зоне поверхности свода может иметь значительные напряжения сжатия в площадках, нормальных к свободной поверхности, в то время как в площадках, касательных к этой поверхности, напряжения равны нулю. Такое напряженное состояние имеет место, например, при образовании свободностоящего вертикального откоса связного насыпного материала. Давление в горизонтальных площадках в таком материале равно $h\gamma$ (h — глубина погружения площадки под поверхностью откоса; γ — объемный вес материала), а в вертикальных — нулю.

Точно так же при образовании сводов в мелкофракционном связном материале нормальные напряжения сжатия в площадках, перпендику-

лярных к линии свода, имеют некоторое конечное значение σ_n, а напряжения в площадках, касательных к линии свода, равны нулю (рис. 2, *а*). Двухлепестковая фигура представляет собой геометрическое место точек концов векторов нормального напряжения сжатия для площадок, проходящих через точку 0. Линия свода совпадает с траекториями наибольших главных напряжений. Напряжения сжатия σ_n в площадках, перпендикулярных к линии свода, растут при перемещении от центра свода к его основанию, получая наибольшее значение у основания свода. Это напряжение тем выше, чем больше выпускное отверстие. Наибольшая допустимая для равновесия данного материала величина этого напряжения σ_{max} определится кругом напряжений, касательным одновре-

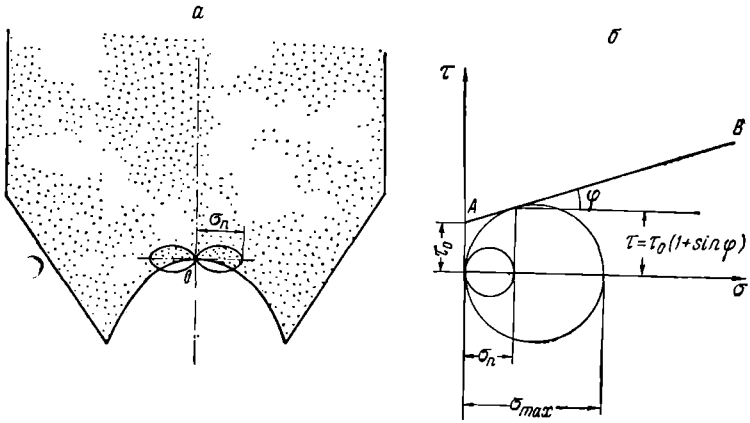


Рис. 2. Схема образования свода

менно оси τ и линии предельных касательных напряжений AB (рис. 2, *б*). Такое напряженное состояние может возникнуть только при определенном размере выпускного отверстия, которое принято называть сводообразующим отверстием. При размерах выпускных отверстий бо́льших, чем сводообразующее, напряжения сжатия σ_n превысят некоторое σ_{max}. При этом в материале произойдут пластические деформации, равновесие свода нарушится и истечение материала будет происходить беспрепятственно.

На основе этих рассуждений Р Л. Зенков графоаналитическим методом получил следующую формулу, проверенную экспериментально на моделях бункеров для мелкофракционного малосвязного материала:

$$R = \frac{\tau_0 (1 + \sin \varphi)}{\gamma}, \qquad (11)$$

где R — гидравлический радиус сводообразующего отверстия, *м*;
τ_0 — первоначальное сопротивление сдвигу, *кГ/м²*;
φ — угол внутреннего трения, *град*;
γ — объемный вес, *кг/м³*

Постановка экспериментов с сильносвязными материалами в лабораторных условиях затруднительна и Р Л. Зенковым не проводилась.

Теоретические выводы Р Л. Зенкова строго обоснованы и не вызывают сомнений. Они хорошо подтверждаются экспериментом на малосвязных материалах. Это позволяет с помощью зависимости (11) для конкретного материала рассчитать оптимальные параметры бункера. Для этого в лабораторных условиях достаточно определить объемный вес, угол внутреннего трения и первоначальное сопротивление сдвигу

данного малосвязного материала, а затем по формуле (11) вычислить размеры сводообразующего отверстия. Бункер, построенный с выпускным отверстием несколько бо́льшим, чем сводообразующее, должен обеспечить беспрепятственное истечение материала.

В связи с этим несомненный интерес представляет выявление возможности применения рассмотренного метода при расчетах промышленных бункеров для сильносвязных материалов. Теоретические исследования Р Л. Зенкова позволяют предполагать, что формулу (11) можно применять для материалов любой степени связности. Однако, как отмечалось выше, экспериментальные исследования в этой области не проводились и вопрос этот остается открытым. Причиной этому, вероятно, послужило то обстоятельство, что на процесс сводообразования оказывает влияние слишком большое число взаимозависимых факторов, основными из которых являются: 1) физико-механические свойства бункеризуемого материала (степень связности, угол внутреннего трения, влажность, объемный вес, гранулометрический состав, пористость и т. д.); 2) наличие отрицательных температур; 3) геометрические параметры бункера (форма, высота, углы наклона стенок днища, размер и форма выпускного отверстия); 4) способ загрузки материала; 5) время хранения материала в бункере.

Количественная оценка влияния каждого из этих факторов на процесс сводообразования остается малоизученной, так как установление зависимостей влияния друг на друга, а следовательно, и на процесс сводообразования различных факторов представляет большие трудности. Например, увлажнение материала ведет к изменению объемного веса, пористости, первоначального сопротивления сдвигу и т. д. Характер этих изменений зависит, в свою очередь, от гранулометрического состава, окружающей температуры и ряда других факторов. Такое многообразие связей и в ряде случаев сложность их расчленения вынуждают исследователя в каждом конкретном случае наблюдать лишь суммарный эффект действия всех факторов, в то время как только один или несколько факторов могут представлять самостоятельный интерес, остальные же, являясь побочными, лишь затемняют конечный результат исследования. По этой причине некоторые исследователи за основные факторы принимали, например, влажность материала и углы наклона стенок днища и изучали влияние этих факторов на процесс сводообразования [10]. Другие примерно таким же образом исследовали влияние на процесс сводообразования геометрической формы бункера и расположения выпускного отверстия [2] и т. д. При этом, как правило, совершенно не учитывалось влияние остальных факторов. Подобные исследования давали частные решения лишь для конкретных условий или позволяли выявить некоторые качественные закономерности влияния того или иного фактора на процесс сводообразования.

В исследованиях Р Л. Зенкова рассматривается одновременное влияние на процесс сводообразования значительно большего числа факторов, однако ряд важных факторов по-прежнему остается неучтенным. Формулой (11), например, совершенно не учитывается влияние таких факторов, как форма и размер бункера, способ загрузки, время хранения и т. д. Влияние же их на процесс сводообразования, особенно в промышленных бункерах, может быть весьма значительным. В связи с этим исследования Р Л. Зенкова не получили дальнейшего развития и широкого практического применения. Этому способствовало и то обстоятельство, что в последнее время в изучении явления сводообразования широкое распространение получил метод моделирования, для

эффективного применения которого необходимо знание законов подобия. Однако существующие законы подобия в приложении к изучению процесса сводообразования в мелкофракционных связных материалах далеко не совершенны, так как на процесс сводообразования в связных материалах оказывает влияние слишком большое число взаимозависимых факторов. При моделировании неизбежно изменение количественных показателей некоторых из этих факторов (гранулометрического состава, влажности, степени связности и т. д.). Изменение хотя бы одного фактора вызывает изменение ряда других, которые, в свою очередь, также

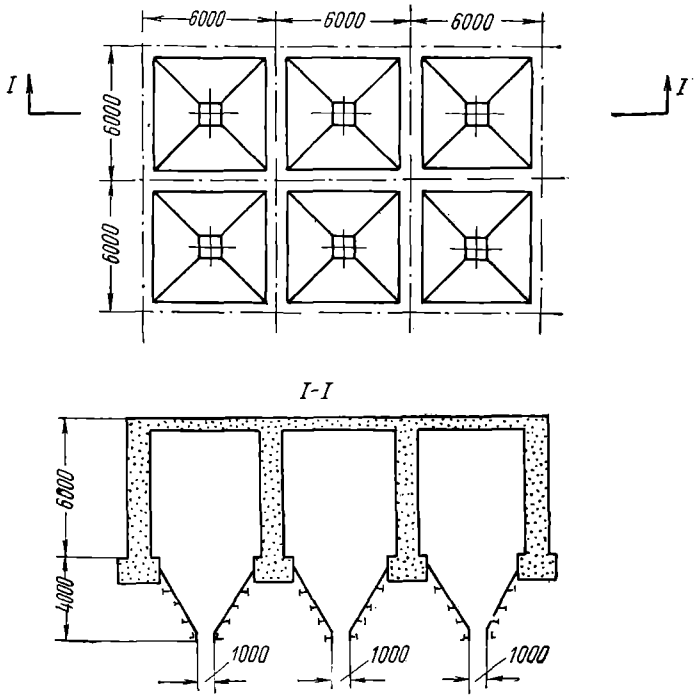


Рис. 3. Схема бункеров обогатительной фабрики

влияют на процесс сводообразования. Причем характер этих изменений обусловлен одновременным влиянием слишком большого числа других факторов, трудно дифференцируемых экспериментально. Выделение и изучение влияния каждого из них представляет сложную задачу, неразрешенную до конца и до настоящего дня, в связи с чем метод моделирования при изучении процесса сводообразования в мелкофракционных связных материалах остается малоэффективным и применение его в этой области вряд ли следует считать перспективным.

Для получения более четкого представления по всем рассмотренным выше вопросам был проделан ряд экспериментов.

Характерным для этих экспериментов явилось рассмотрение одновременного влияния на процесс сводообразования значительно большего числа факторов, чем во всех предыдущих исследованиях. Это дало возможность выявить более общие закономерности процесса сводообразования. Более детально выявились закономерности влияния некоторых факторов на изменение остальных, а также исследовалась возможность применения формулы (11) при расчетах размеров сводообразующего отверстия в промышленных бункерах для сильносвязных материалов.

В процессе исследования производилось непосредственное наблюдение за работой промышленных бункеров обогатительной фабрики комбината Североникель и на моделях этих бункеров в лаборатории рудничного транспорта Ленинградского горного института. Отмечалось число сводообразований на единицу веса выпущенного материала. Определялись физико-механические показатели исследуемого материала: объемный вес; угол внутреннего трения (в лабораторных условиях с помощью прибора для определения коэффициента внутреннего трения и сцепления конструкции Гидропроекта, а в производственных условиях с помощью полевого прибора на сдвиг); первоначальное сопротивление сдвигу — сцепление (с помощью тех же приборов, а для крупных материалов с помощью прибора для определения высоты свободно стоящей вертикальной стенки насыпного груза).

Ввиду больших трудностей по загрузке различных материалов в один и тот же промышленный бункер в обогатительно-металлургическом цехе комбината Североникель было выбрано для наблюдений двенадцать совершенно одинаковых бункеров, заполненных различными материалами (рис. 3). Для наблюдений выбирались те бункера, в которых содержался материал со свойствами, представляющими наибольший интерес для изучения их влияния на процесс сводообразования.

Проведение широкой программы исследований в подобных условиях представляет большие трудности, поэтому наряду с экспериментами на промышленных бункерах проводились исследования в лабораторных условиях на моделях бункеров, выполненных в масштабе 1 : 10. Лабораторные исследования давали возможность более широко и детально выявить некоторые качественные и количественные закономерности влияния на процесс сводообразования различных факторов, а также позволяли наметить программу наблюдений на промышленных бункерах. Более детальные показания работы моделей сравнивались с наиболее характерными показаниями работы промышленных бункеров.

Для исследования влияния отрицательных температур и влажности материала на процесс сводообразования выполнены многочисленные экспериментальные исследования в лабораторных и производственных условиях с материалами различного гранулометрического состава. Основные данные этих исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

Температура внутри бункера, *град*	Влажность, %	τ_0, *кГ/м²*	γ, *т/м³*	φ, *град*	R по формуле (11), *м*	Число сводообразований на 400 *кг* выпущенного материала из модели или 400 000 *кг* — из промышленного бункера
Песок, класс—2+0,05; R_0=0,025 *м*						
+10—15	0	—	1,70	36	—	0
	2	12	1,72	36	0,01	0
	4	27	1,75	36	0,025	1—6
	6	41	1,77	36	0,036	10—40
	8	80	1,8	36	0,07	Материал не истекает
	10	110	1,82	36	0,09	То же
—15	0	—	1,70	36	—	0
	4	112	1,75	36	0,1	Материал не истекает

Продолжение табл.

Температура внутри бункера, *град*		$\bar{\tau}_0$, *кГ/м²*	$\bar{\gamma}$, *т/м³*	$\bar{\varphi}$, *град*	*R* по формуле (11), *м*	Число сводообразований на 400 *кг* выпущенного материала из модели или 400 000 *кг* из промышленного бункера
Руда, класс—50+0; R_0=0,25 *м*						
+5—10	4	120	2,06	38	0,13	0—1
	8	186	2,10	38	0,15	3—4
—15	12	270	2,13	38	0,2	Для истечения материала необходима непрерывная шуровка
Дресва, класс—6+4; R_0=0,025 *м*						
+10—15	0	16	1,80	37	0,014	0
	4	16	1,81	37	0,014	0
—15	0	16	1,80	37	0,014	0
	4	20	1,81	37	0,017	0
Щебенка, класс—25+16; R_0=0,25 *м*						
+10	3	45	1,65	40	0,043	0
—15	3	60	1,65	40	0,06	0

Примечание. R_0—фактический гидравлический радиус выпускного отверстия.

Для исследования влияния гранулометрического состава на процесс сводообразования в модель бункера, имеющего R_0=0,025 *м*, последовательно загружались четыре смеси никелевой руды различного гранулометрического состава при влажности каждой смеси 2% (табл. 2, 3).

Таблица 2

Номер смеси	*кГ/м²*	*т/м³*	φ, *град*	*R* по формуле (11), *м*	Число сводообразований на 400 *кг* выпущенного материала
1	75	1,65	36	0,07	Материал не истекает
2	51	2	36	0,04	20—40
3	32	1,95	37	0,026	1—4
4	18	1,8	38	0,016	0

Таблица 3

Размер кусков, *мм*	Содержание частиц различной крупности в смеси, вес %			
	1	2	3	4
—0,05+0,002	60	5	—	—
—2+0,05	20	20	5	—
—6+2	20	75	95	100

Влияние гранулометрического состава на процесс сводообразования в промышленных условиях наблюдалось на нескольких совершенно одинаковых бункерах, имеющих $R_0 = 0{,}25$ *м* и предназначенных для хранения различных материалов (см. табл. 4).

Таблица 4

Номер бункера	Материал	Влажность, %	Гранулометрический состав, *мм*	τ_0, *кГ/м²*	γ, *т/м³*	φ, *град*	R по формуле (11), *м*	Число сводообразований на 400 000 *кг* выпущенного материала
1	Концентрат	4	0,071	195	1,63	36	0,19	10—20
2	Руда	8	—50+0	186	2,06	38	0,15	3—4
3	Щебенка	3	—25+16	45	1,653	40	0,043	0

Примечание. 1—бункер для флотационного концентрата никелевой руды; 2—бункер для рядовой руды; 3—бункер для хвостов магнитной сепарации.

Анализ приведенных экспериментов позволяет обнаружить следующие общие закономерности.

1. Влияние того или иного фактора на процесс сводообразования проявляется лишь в том случае, если одновременно наблюдается значительное влияние этого же фактора на изменение значения первоначального сопротивления сдвигу в сторону его увеличения. Например, увлажнение мелкофракционного материала ведет к значительному увеличению первоначального сопротивления сдвигу (табл. 1) При этом одновременно увеличивается тенденция к сводообразованию. Та же закономерность наблюдается при изменении гранулометрического состава (табл. 2 и 4), влиянии отрицательных температур (табл. 1) и т. д.

В тех же случаях, когда не проявляется заметного влияния того или иного фактора на изменение первоначального сопротивления сдвигу, наличие данного фактора не сказывается и на процессе сводообразования. Например, увлажнение сортированного материала, не содержащего мелких фракций, совершенно не отражается на процессе сводообразования (табл. 1) При этом не наблюдается сколько-нибудь заметного изменения первоначального сопротивления сдвигу.

2. Изменение различных факторов оказывает незначительное влияние на изменение объемного веса и особенно внутреннего угла трения.

3. Расчетные данные по формуле (11) хорошо подтверждаются экспериментом лишь при заполнении бункера малосвязными материалами. Например, при загрузке малосвязных материалов в бункер с размером выпускного отверстия несколько бо́льшим, чем сводообразующее отверстие, истечение материала происходит беспрепятственно (табл. 1). Для сильносвязных материалов это условие не выполняется.

Выводы

1. Из рассмотренных факторов лишь наличие связности материала, характеризуемое первоначальным сопротивлением сдвигу, является необходимым и достаточным условием для оказания влияния на процесс сводообразования. Наличие остальных факторов в отдельных случаях бывает достаточным условием, но не является необходимым. Склонность к сводообразованию увеличивается только в том случае, если под воздействием того или иного фактора одновременно увеличивается и значение первоначального сопротивления сдвигу.

2. Влиянием изменения объемного веса и угла внутреннего трения на процесс сводообразования можно пренебречь, поскольку эти факторы изменяются в очень узких пределах.

3. Зависимость сводообразования от связности материала позволяет рассматривать качественную сторону влияния различных факторов не непосредственно на сводообразование, а на изменение значения первоначального сопротивления сдвигу, что возможно осуществить в лабораторных условиях для материалов любой степени связности.

4. С этой точки зрения надо также рассматривать и влияние на сводообразование в связных материалах некоторых параметров бункера. Например, при загрузке бункеров хорошо сыпучим материалом процесс истечения зависит только от размеров выпускного отверстия и не зависит от таких параметров, как углы наклона стенок и высота бункера. При загрузке же связными материалами геометрические параметры бункеров начинают оказывать заметное воздействие, что объясняется уплотнением материала и, следовательно, увеличением первоначального сопротивления сдвигу.

5. Предлагаемый метод перспективен при теоретическом определении оптимальных параметров промышленных бункеров для сильносвязных материалов. Однако теоретические расчеты по формуле (11) для связных материалов расходятся с экспериментальными данными и тем значительнее, чем больше связность материала.

Наблюдения за работой промышленных бункеров и исследования на моделях позволили обнаружить причины этого расхождения, заключающиеся в следующем.

При исследовании процесса сводообразования в малосвязных материалах на моделях бункеров материал, загруженный в бункер, и тот же материал, находящийся в штабеле, были примерно в одинаковых условиях. Иначе все обстоит при загрузке сильносвязного материала в промышленный бункер большой емкости. Материал, находящийся в зоне выпускного отверстия такого бункера, подвергается влиянию ряда факторов, которые вызывают значительное изменение первоначального сопротивления сдвигу. Поэтому величина первоначального сопротивления сдвигу, определенная экспериментально для материала, взятого из штабеля, будет значительно отличаться от той же величины того же материала, находящегося в зоне выпускного отверстия. Наиболее заметное влияние на изменение первоначального сопротивления сдвигу в промышленном бункере оказывают следующие факторы:

а) сегрегация, в результате которой в случае центральной загрузки в середине бункера сосредоточиваются мелкие фракции, а по краям — более крупные;

б) миграция влаги, так как в зимнее время в отапливаемых бункерах под воздействием разности температур в материале, расположенном у стенок бункера и в центральной части, происходит перемещение влаги от теплых слоев к холодным; в результате влажность в центральной части увеличивается;

в) отрицательная температура, при которой часть влаги превращается в лед, цементирующий частицы материала;

г) срок хранения, в результате которого некоторые материалы при длительном хранении обладают склонностью к слеживанию;

д) геометрические параметры бункера, влияющие на величину давления в зоне выпускного отверстия, значение которой достаточно точно можно подсчитать теоретическим путем для заданного бункера и извест-

ного материала; в результате увеличения давления материал уплотняется.

Влияние рассмотренных факторов формулой (11) совершенно не учитывается, что и приводит к расхождению теоретических данных с экспериментальными. Чтобы избежать этого расхождения, необходимо предусмотреть возможное влияние перечисленных факторов в каждом конкретном случае и при определении первоначального сопротивления сдвигу создать их искусственно. Первоначальное сопротивление сдвигу, полученное таким образом, позволяет достаточно точно определить по формуле (11) величину сводообразующего отверстия в промышленном бункере для сильносвязного материала. Это дает возможность теоретически определить оптимальные параметры бункера для материала любой степени связности применительно к любым конкретным условиям, а также разработать наиболее эффективные мероприятия по предотвращению или значительному уменьшению сводообразований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алферов К. В., Зенков Р. Л. Бункерные установки. Машгиз, 1955.
2. Блох В. И. и Чайка Г. К вопросу о рациональной форме бункера, «Сталь», 1935, № 5.
3. Васильев Н. В. и Олевский В. А. Транспорт на обогатительных фабриках. Углетехиздат, 1949.
4. Заболодский В. Г Щелевые бункеры и средства их механического опорожнения. «Внутризаводской транспорт и стальные конструкции», 1937, № 2.
5. Зашквара В. Г. Конструкция бункеров, силосов и угольных башен с точки зрения зависания угля и шихты. «Кокс и химия», 1940, № 9.
6. Зенков Р. Л. Механика насыпных грузов. Машгиз, 1952.
7. Карелин Н. Т. и Факторович А. М. Об автоматизации бункерной погрузки. Зап. ЛГИ, 1956, т. XXXIII, вып. 1.
8. Минаев С. С. Зависание руды при выпуске. «Горный журнал», 1941, № 5.
9. Писаревский М. А. и Грибоедов Е. Н. Способы борьбы с зависанием руды в бункерах. «Обогащение руд», 1957, № 3.
10. Flow of Coal from Bins. Colliery Guard., 1958, № 5093, p. 446—449.
11. Wettich H. Stahl und Eisen, 1915, № 20.
12. The Internal Movement of Sand. Engineering, 1932, v. 133, Feb. 5.