

Р.В. Кирия, к.т.н., В.Ю. Максютенко, к.т.н.,  
Д.Д. Брагинец, мл. научн. сотр.,  
Б.И. Мостовой мл. научн. сотр.  
(ИГТМ НАН Украины)

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА СЫПУЧЕГО ГРУЗА ИЗ БУНКЕРА С РЕГУЛИРУЕМОЙ ЗАСЛОНКОЙ**

Розроблена математична модель витікання сипкого вантажу із бункера з боковим щілистим випускним отвором і регульованою заслінкою. Знайдена залежність витрати сипкого вантажу із бункера від кута нахилу заслінки. Отримані результати порівнювалися з експериментальними даними.

## **DEFINING OF THE EXPENDITURE OF FRIABLE LOAD FROM BUNKER WITH MANAGED SHUTTER**

The mathematical model of expiration of friable load from a bunker with a lateral crack tape-hole and managed shutter is developed. Dependence of expenditure of friable load from a bunker from the angle of slope of shutter is found. The received results were compared to experimental data.

Одним из путей повышения эффективности работы горно-транспортного оборудования является применение компьютерных технологий, позволяющих адаптировать работу системы транспорта к изменяющимся условиям работы конвейерных линий с минимальным участием человека.

Для эффективной работы бункеров в таких системах транспорта необходимо иметь управляемые средства их разгрузки, позволяющие поддерживать стабильные параметры грузопотока при изменении внешних условий.

Существуют два основных способа регулирования потока сыпучего груза из бункера: с помощью питателя и с помощью регулируемых затворов.

В настоящее время для подземных бункеров наиболее широко применяется первый способ, так как он обеспечивает стабильность разгрузки потока груза из бункера. Основным недостатком этого способа является отсутствие управления в случае изменения поступающего грузопотока, т.е. неспособность адаптироваться к условиям изменения поступающего грузопотока, что приводит к повышению энергозатрат на разгрузку.

Разгрузка подземных бункеров, работающих в системах конвейерного транспорта, с помощью регулируемых затворов практически не применяется, не смотря на их очевидные достоинства: малые по сравнению с питателями габариты; простота конструкции и самое главное – гравитационная разгрузка материала из бункера, не требующая дополнительных затрат энергии. Это связано с отсутствием характеристики бункера т.е. аналитической зависимости расхода сыпучего груза из бункера от угла наклона заслонки.

В работах [1, 2] разработаны математические модели истечения сыпучего груза из бункера с различным расположением щелевого отверстия и определена производительность разгрузки сыпучего груза из бункера в зависимости от ширины выпускного отверстия бункера.

Однако математических моделей истечения сыпучего груза из бункера с регулируемой заслонкой не существует.

Целью работы является определение расхода сыпучего груза из бункера с боковым щелевым отверстием и регулируемой заслонкой в зависимости от угла наклона заслонки.

Задачами исследования являются: разработка математической модели истечения сыпучего груза из бункера со щелевым боковым отверстием и регулируемой заслонкой и установление зависимости расхода сыпучего груза из бункера от угла наклона заслонки; проведение экспериментальных исследований с целью проверки достоверности результатов теории.

Рассмотрим истечение сыпучего груза из прямоугольного бункера с боковым щелевым отверстием шириной  $a$  и длиной  $b$  ( $b > a$ ) и углом наклона заслонки к боковой стенке бункера  $\alpha$  (рис. 1).

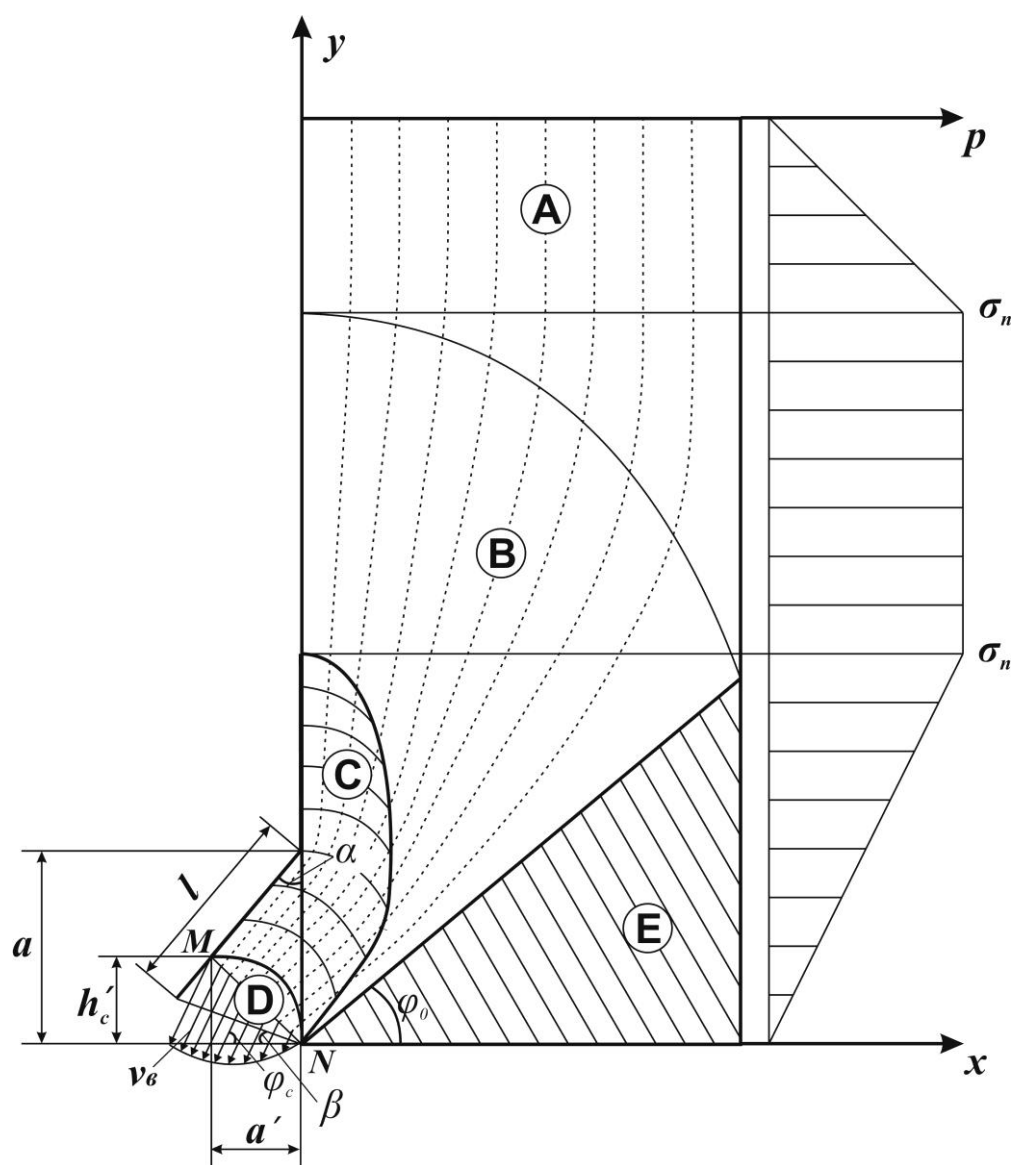


Рис. 1 – Зоны структурно-механического состояния сыпучего груза при его истечении из бункера с боковым щелевым выпускным отверстием и регулируемой заслонкой

На основе визуальных исследований процесса истечения сыпучего груза из бункера с боковым щелевым отверстием и регулируемой заслонкой, так же, как и для бункера с боковым или горизонтальным щелевым выпускным отверстием [1,2], можно выделить 5 зон: **A**, **B**, **C**, **D**, **E**, отличающихся друг от друга структурно-механическим состоянием сыпучего груза (см. рис. 1).

В зоне поршневого движения **A** (см. рис. 1) частицы сыпучего груза связаны между собой и движутся с постоянной малой скоростью параллельно стенкам бункера.

В зоне **B** (см. рис. 1) частицы насыпного груза скользят относительно друг друга, а их траектории искривляются в направлении к выпускному отверстию. В этой зоне скорости частиц также малы и изменяются незначительно.

В зоне динамического свода **C** (см. рис. 1) частицы сыпучего груза образуют подвижные полусводы, движущиеся вниз, скользя по стенкам бункера и канала, а затем по поверхности заслонки. При этом скорости частиц сыпучего груза существенно увеличиваются, а их траектории искривляются, приближаясь на выходе из бункера к наклонным прямым линиям.

В зоне обрушения (перемешивания) **D** связи между частицами сыпучего груза разрушаются, при этом они находятся в непрерывном хаотическом движении, сталкиваясь между собой. Траектории движения частиц в этой зоне совпадают с прямыми наклонными линиями, составляющими угол наклона к горизонту  $\varphi$ . При этом, угол  $\varphi$  изменяется с изменением координаты  $y$  в пределах  $90^\circ - \alpha < \varphi < 90^\circ$ . Угол  $\varphi_0$  равен углу наклона границы, разделяющей область подвижного и область неподвижного состояния **E** сыпучего груза в бункере. При этом скорость частиц в зоне **D** под действием силы тяжести увеличивается.

В зоне **E** частицы сыпучего груза находятся в неподвижном состоянии.

Кроме того, нормальные напряжения  $p$  сыпучего груза в бункере в зоне **A** увеличиваются с глубиной бункера линейно. В зоне **B** нормальное напряжение достигает максимального значения  $\sigma_n$  и не изменяется с глубиной бункера. А в зоне **C** нормальное напряжение уменьшается с глубиной бункера линейно и при приближении к выпускному отверстию уменьшается до нуля (см. рис. 1).

Сыпучий груз в зонах **A**, **B**, **C**, **E** движется так же, как и в бункере с боковым или горизонтальным щелевым выпускным отверстием [1,2]. Поэтому все уравнения, описывающие состояние груза в этих зонах для бункера с горизонтальным щелевым выпускным отверстием, совпадают и для бункера с горизонтальным щелевым выпускным отверстием.

Свободно-дисперсное движение сыпучего груза в зоне обрушения **D** в бункере с боковым щелевым выпускным отверстием будет отличаться от движения сыпучего груза в бункере с горизонтальным щелевым выпускным отверстием.

В нашем случае зона динамического свода **C** в отличие от бункера с боковым щелевым отверстием без заслонки продлится дальше вдоль заслонки, и ее нижняя граница в виде параболы с параметрами  $h'_c$  и  $a'$  соединит точки **M** и **N** (см.рис. 1). При этом  $h'_c$  и  $a'$  уменьшаются с уменьшением угла наклона

заслонки  $\alpha$  и при  $\alpha \rightarrow 0$   $h'_c \rightarrow 0$  и  $a' \rightarrow 0$ . В данном случае зона обрушения **D** находится ниже нижней границы динамического свода и представляет собой область, ограниченную параболой MN и отрезком, соединяющим концевые точки параболы (см.рис. 1).

Так, как и в работах [1,2], при описании движения сыпучего груза в области **D** применим теорему Бернулли [3]. В результате объемный расход  $Q$  сыпучего груза через боковое щелевое отверстие с регулируемой заслонкой определим по формуле

$$Q = \eta b a^{1.5} \sqrt{g}, \quad (1)$$

где

$$\eta = \frac{\delta \eta_0}{\sqrt{\delta^2 + k^2 K_1 K_2}}, \quad (2)$$

$$\delta = \frac{a}{d}, \quad K_1 = \frac{1}{2} \left( f + \sqrt{1 + f^2} \right), \quad \chi' = f + \frac{1}{f} - \sqrt{1 + f^2};$$

$$\eta_0 = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin(\varphi_c + \beta) B \sqrt{A + \chi'} \left( \frac{\operatorname{tg} \alpha}{1 + K_1 \operatorname{tg} \alpha} \right)^{\frac{3}{2}};$$

$$A = \frac{\operatorname{tg} \varphi_c (K_1 - \operatorname{tg} \beta)}{\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \varphi_c}; \quad B = \frac{K_1 + \operatorname{tg} \varphi_c \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}}{\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \varphi_c}.$$

Здесь  $\eta$  – безразмерный коэффициент расхода сыпучего груза из бункера ( $\eta = \sqrt{F_r}$ ,  $F_r$  – Критерий Фруда);  $d$  – средний размер частиц сыпучего груза, м;  $k$  – кинетический коэффициент, характеризующий потерю механической энергии потока сыпучего груза в результате столкновения частиц ( $k = 10-13$ );  $K_2$  – некоторый безразмерный коэффициент, зависящий от условий истечения сыпучего груза из бункера (прямое или боковое истечение сыпучего груза из бункера) и определяемый из эксперимента;  $f$  – коэффициент внутреннего трения сыпучего груза;  $\alpha$  – угол наклона заслонки, град.;  $\beta$  – угол наклона выходного сечения сыпучего груза из бункера с регулируемой заслонкой, т.е. угол наклона отрезка MN к горизонтали (см. рис. 1), град.;  $\varphi_c$  – среднее значение угла наклона вектора скорости выхода частиц груза из бункера к горизонтали, град.

При этом угол  $\beta$  определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\frac{a}{l} - \sin \alpha}{\cos \alpha};$$

$$0 \leq \beta \leq \arctg \frac{a}{l}.$$

Среднее значение угла  $\varphi_c$  приблизительно можно определить по формуле

$$\varphi_c = \frac{180 - \alpha}{2}.$$

Из формулы (2) следует, что при  $\delta \rightarrow \infty$   $\eta \rightarrow \eta_0$  т.е. при больших  $\delta$  (мелких сыпучих грузах) коэффициент расхода  $\eta$  для заданного угла наклона заслонки  $\alpha$  принимает постоянное значение  $\eta_0$  не зависящее от  $\delta$  (от ширины отверстия  $a$  и среднего размера частицы  $d$  сыпучего груза).

На рис. 2 показаны графики зависимости коэффициента расхода сыпучего груза из бункера с боковым щелевым отверстием  $\eta$  от  $\delta$  при различных углах наклона заслонки  $\alpha$  рассчитанные по формуле 2.

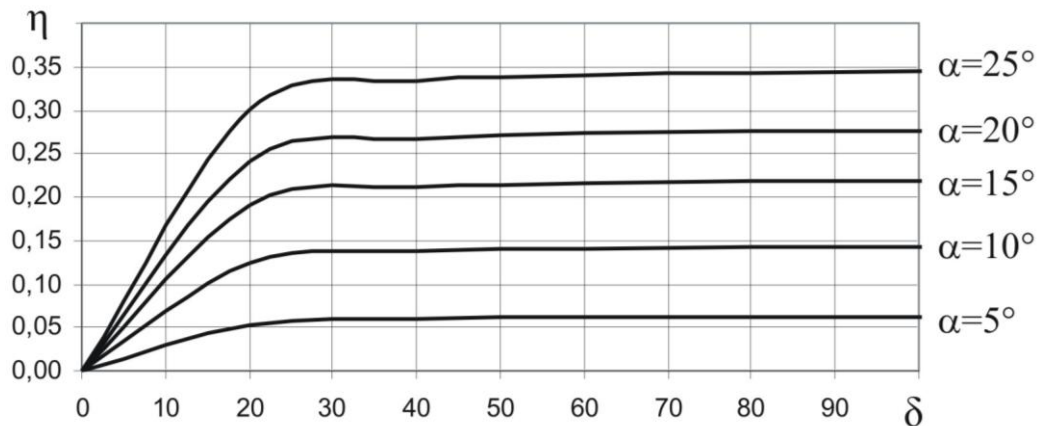


Рис. 2 – График зависимости коэффициента  $\eta$  от безразмерного параметра  $\delta$  для бункера с боковым щелевым выпускным отверстием с регулируемой заслонкой при различных углах наклона заслонки

При этом параметры бункера и сыпучего груза принимали значения:  $b = 0,09$  м;  $l = a$ ;  $f = 0,64$ ;  $\varphi_c = 85^\circ$ ;  $K_2 = 1$ ,  $\alpha = 5^\circ$ ;  $10^\circ$ ;  $15^\circ$ ;  $20^\circ$ ;  $25^\circ$ .

Из рис. 2 видно, что с увеличением  $\delta$ , т.е. уменьшением диаметра частиц сыпучего груза  $d$ , при любом угле наклона заслонки  $\alpha$  коэффициент расхода  $\eta$  сыпучего груза из бункера увеличивается и при значениях  $\delta > 30$  принимает постоянное значение, зависящее от угла  $\alpha$  (при  $\alpha = 5^\circ$ ;  $10^\circ$ ;  $15^\circ$ ;  $20^\circ$ ;  $25^\circ$ ;  $\eta = 0,054$ ;  $0,13$ ;  $0,206$ ;  $0,278$ ;  $0,345$ ).

На рис. 3 показан график зависимости коэффициента расхода  $\eta$  сыпучего груза из бункера с боковым щелевым выпускным отверстием от угла наклона заслонки  $\alpha$ ,  $\delta = 30$ , построенный согласно формуле (2). При этом параметры бункера и груза принимали значения:  $b = 0,09$  м;  $l = a$ ;  $f = 0,64$ ;  $\varphi_c = 85^\circ$ ;  $K_2 = 1$ .

Там же (см. рис. 3) точками показаны экспериментальные значения коэффициента расхода  $\eta$  для углов наклона заслонки  $\alpha = 5^\circ$ ;  $10^\circ$ ;  $15^\circ$ ;  $20^\circ$ ;  $25^\circ$ ; при

различных значениях ширины щели  $a = 10; 20; 30; 40; 50; 60$  мм.

При этом средний диаметр частиц сыпучего груза  $d = 0,4-1$  мм.

Из рис. 3 видно, что теоретическая кривая при углах наклона заслонки  $\alpha$ , изменяющихся в интервале  $5^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ , с точностью до 10 % совпадает с результатами эксперимента.

При значениях  $\alpha \geq 25^\circ$  экспериментальные значения практически не изменяются и существенно отличаются от теории. Это связано с тем, что при углах поворота заслонки  $\alpha \geq 25^\circ$  струя сыпучего груза при истечении из бункера не касается заслонки.

При этом значение  $\eta$  при  $\alpha \geq 25^\circ$  практически совпадает со значением  $\eta = 0,34$ , полученном при выпуске из бункера с боковым щелевым отверстием [2] при  $\delta > 50$ .

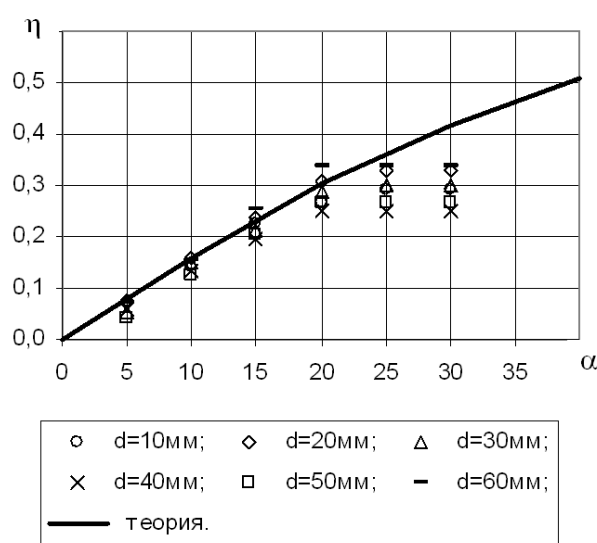


Рис. 3 – График зависимости коэффициента  $\eta$  от угла наклона заслонки  $\alpha$  для бункера с боковым щелевым выпускным отверстием и регулируемой заслонкой

Кроме того, скученность экспериментальных точек при различной ширине выпускной щели  $a$  подтверждает характер зависимости  $\eta$  от  $\delta$  при  $\delta > 50$  (см. рис. 2), т.е.  $\eta$  зависит от  $\delta$ , которое в свою очередь зависит от  $a$ , при  $\delta > 30$ .

В результате решения поставленных задач были получены следующие результаты:

– разработана математическая модель истечения сыпучего груза из бункера с боковым щелевым выпускным отверстием;

– получена линейная зависимость коэффициента расхода сыпучего груза из бункера от угла наклона заслонки  $\alpha$ , т.е. найдена характеристика истечения сыпучего груза из бункера с боковым щелевым отверстием и регулируемой заслонкой.

Сравнение теоретических расчетов с результатами экспериментов показало, что расхождение теории с экспериментом не превышает 10 %. Кроме того, из экспериментальных исследований следует, что угол наклона заслонки, при

котором заслонка оказывает влияние на расход груза при его истечении из бункера, находится в пределах  $0^\circ < \alpha < 20^\circ$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирия Р.В. К вопросу об истечении сыпучего груза из бункера со щелевым отверстием / Р.В. Кирия, В.Ю. Максютенко, Д.Д. Брагинец, Б.И. Мостовой // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАНУ. - Днепропетровск, 2008 - Вып. 80. - С. 351-362.
2. Кирия Р.В. Истечение сыпучего груза из бункера с боковым щелевым отверстием / Р.В. Кирия, Д.Д. Брагинец, Б.И. Мостовой // Сборник научных трудов Национального горного университета. - Днепропетровск. - 2009. - № 34. - С. 114-122.
3. Штернлихт Д.В. Гидравлика / Д.В. Штернлихт. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 639 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н С.П. Мінеєвим 23.07.09*